

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2013

Barbora Svobodová

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Návrh experimentálního měřicího pracoviště pro fototerapii

Design of the Experimental Facility for Measuring Phototherapy

2013

Barbora Svobodová

Zadání bakalářské práce

Student: **Barbora Svobodová**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3901R039 Biomedicínský technik
Téma: **Návrh experimentálního měřicího pracoviště pro fototerapii**
Design of the Experimental Facility for Measuring Phototherapy

Zásady pro vypracování:

1. Obecná analýza fototerapie.
2. Návrh experimentálního mechanicko-optického měřicího pracoviště.
3. Dle možností realizace experimentálního mechanicko-optického měřicího pracoviště.
4. Návrh softwarového ovládání a vizualizace dat v prostředí LabView pro spektrofotometr.
5. Celkové testování měřicí sestavy.
6. Zhodnocení výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

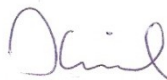
- [1] HRAZDÍRA, Ivo a Vojtěch MORNSTEIN. *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. 1. vyd. Brno: Neptun, 2001. 381 s. ISBN 0-902896-1-4.
- [2] ŠAJTER, Vít et al. *Elektroterapie a fototerapie*. Martin(SK): Osveta, c2005. 126 s. ISBN 8080631719.
- [3] NAVRÁTIL, Leoš et al. *Moderní fototerapie a laseroterapie*. Praha: Magnus, 2000. 227 s. ISBN 80-902318-3-7.
- [4] JAVŮREK, Jan. *Fototerapie biolaserem: léčebná metoda budoucnosti*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 1995. 201 s. ISBN 80-7169-046-5.
- [5] PECHOUŠEK, Jiří. *Základy programování v prostředí LabVIEW*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2004. 84 s. ISBN 80-244-0800-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Penhaker, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

Datum odevzdání bakalářské práce: 7. 5. 2013



.....

Barbora Svobodová

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala panu Ing. Markovi Penhakerovi, Ph. D. za rady při vypracovávání této bakalářské práce. Další obrovské díky patří panu Ing. Marcelovi Mášovi za konzultace, ochotu a velmi cenné rady při řešení zadané problematiky. Na závěr bych ráda projevila poděkování své rodině a přátelům za podporu po celou dobu studia.

Abstrakt

Tématem této bakalářské práce je návrh experimentálního měřicího pracoviště pro fototerapii. Fototerapie je moderní léčebnou metodou, jež využívá pozitivních účinků optického záření na lidský organismus. Samotné ozařování je prováděno za použití různých typů zářičů. K proměřování parametrů těchto zařízení by mělo sloužit vytvořené experimentální pracoviště, jehož ústředním komponentem je spektrofotometr AVANTES Avaspec - 2048. Pro tento spektrofotometr byl naprogramován nový ovládací software ve vývojovém prostředí LabVIEW, a to za použití DLL (dynamicky propojovaných knihoven).

Klíčová slova

Optické záření, optika, zdroje záření, fototerapie, spektrofotometr, LabVIEW.

Abstract

The topic of this thesis is to design the experimental facility for measuring phototherapy. Phototherapy is a modern treatment method that uses the positive effects of optical radiation on the human body. The irradiation is carried out using different types of sources. To measure the parameters of these sources should be used created experimental workplace, whose central component is the spectrophotometer Avantes AvaSpec - 2048. For this spectrophotometer was programmed new software in LabVIEW, using DLL (dynamic link library).

Key words

Optical radiation, optics, radiation sources, phototherapy, spectrophotometer, LabVIEW.

Obsah

1	Úvod	9
2	Optické záření	10
2.1	Rozdělení spektra optického záření	10
2.1.1	Infračervené záření	11
2.1.2	Viditelné záření (světlo)	11
2.1.3	Ultrafialové záření	12
3	Optika	12
3.1	Vlnové vlastnosti světla	12
3.2	Šíření světla	13
3.2.1	Zákon odrazu	13
3.2.2	Zákon lomu (Snellův zákon)	13
3.2.3	Disperze	14
3.3	Kvantová optika	14
3.4	Vlnová optika	15
3.4.1	Interference světla	15
3.4.2	Difrakce	15
3.4.3	Polarizace světla	15
4	Zdroje záření	16
4.1	Žárovky	16
4.2	Luminiscenční zdroje záření	16
4.2.1	Výbojky	16
4.3	Lasery	17
4.4	LED	17
5	Fototerapie	19
5.1	Faktory ovlivňující účinnost fototerapie	19
5.2	Účinky a aplikace viditelného záření (světla)	19
5.3	Účinky a aplikace infračerveného záření	20
5.4	Účinky a aplikace ultrafialového záření	20
5.5	Léčba polarizovaným světlem	21

5.6	Laseroterapie.....	22
5.6.1	Účinky laserového záření	22
5.6.2	Dělení laserů podle výkonu	22
6	Návrh měřicího pracoviště	24
6.1	Spektrofotometr	24
6.1.1	Konstrukce spektrofotometru	24
6.1.2	Spektrofotometr AvaSpec-2048 Standard Fiber Optic	25
6.2	Měřicí pracoviště	27
6.2.1	Měřicí pracoviště pro spektrofotometrická měření.....	27
6.2.2	Měřicí pracoviště s řízeným napájením LED	28
7	Softwarový ovladač pro spektrofotometr.....	29
7.1	LabVIEW	29
7.2	Ovládání spektrofotometru Avantes pomocí LabVIEW	29
7.2.1	Start panel.....	30
7.2.2	Kalibrace	32
7.2.3	Graf.....	35
7.2.4	Měření	37
7.2.5	Řízení zdroje LED	48
8	Experimentální měření - realizace a testování měřicí sestavy a software	50
8.1	Výsledky spektrofotometrických měření.....	51
8.2	Testování ovládání PWM a analogových výstupů.....	55
8.2.1	PWM.....	55
8.2.2	Analogové výstupy	57
9	Zhodnocení výsledků	58
10	Závěr	59
11	Literatura.....	60
12	Seznam příloh	63

1 Úvod

Fototerapie patří mezi léčebné metody moderní medicíny, jež se velice dynamicky rozvíjí, a to zejména v posledních desetiletích. K samotnému ozařování je využívána celá řada různých zdrojů (lasery, výbojky, žárovky, pole LED, atd.), ale léčebný princip je ve všech případech ve své podstatě stejný - energie dopadajících fotonů se přemění na jinou formu energie, obvykle tepelnou, a ta pak působí určitým způsobem na organismus. Fototerapie našla své uplatnění ve většině medicínských odvětví - například v dermatologii, chirurgii, neonatologii, estetické medicíně, rehabilitaci, ale i psychologii.

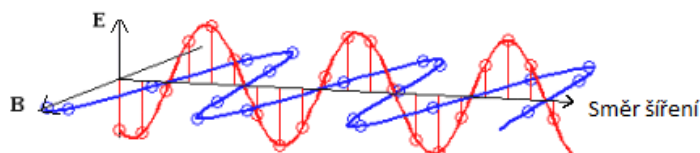
K tomu, aby byla léčba účinná, je nezbytně nutné znát parametry záření emitovaného zdrojem. Pokud by byla terapie prováděna intenzivnějším zářením, než se předpokládalo, mohla by vést k přehřátí organismu nebo dokonce k popáleninám. Těmto vedlejším účinkům se musí předcházet, a právě vytvoření měřicího pracoviště, díky němuž by bylo možné ony požadované parametry záření stanovit, bylo cílem této bakalářské práce.

Nejdůležitějším komponentem celé sestavy je spektrofotometr Avantes Avaspec - 2048. Tento přístroj je schopen naměřit spektrální charakteristiku záření (závislost intenzity na vlnové délce), a hodnoty radiometrických, fotometrických a kolorimetrických veličin. Pracuje v rozsahu ultrafialového, viditelného a blízkého infračerveného záření. Spektrofotometrický přístroj se skládá z optického monochromátoru a detektoru. Záření je z místa měření do přístroje přenášeno optickým vláknem.

Dalším cílem praktické části bakalářské práce bylo naprogramování nového software pro ovládání použitého spektrofotometru, a to ve vývojovém prostředí LabVIEW. Standardně jsou přístroje řízeny programem AvaSoft. Ovšem ne vždy tento ovladač uživatelům plně vyhovuje, proto je zde ještě druhá možnost - využít DLL (dynamicky propojovaných knihoven), jež výrobce rovněž nabízí, a vytvořit si svůj vlastní program, uzpůsobený konkrétním potřebám. DLL obsahují některé již předem naprogramované funkce, které lze v LabVIEW volat. Při programování byly použity knihovny AS-5216-DLL a AVSIRRAD-DLL.

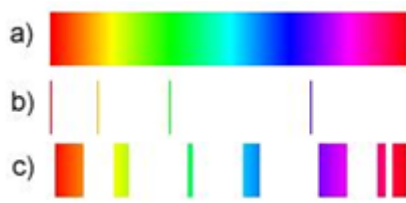
2 Optické záření

Optické záření je elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami v rozmezí od 1 nm po 1 mm. Tento interval hraničí z jedné strany se spektrem radiových vln, a z druhé s rentgenovým zářením. Elektromagnetické vlnění je vlněním příčným (vlny jsou příčné ke směru šíření) a vektor intenzity elektrického pole E je kolmý na vektor magnetické indukce B . [5], [12]



Obrázek 1: Šíření elektromagnetické vlny [17]

Optické záření vyzařují všechna tělesa s termodynamickou teplotou vyšší, než je absolutní nula. Spektrum záření, jež určitá látka emituje, může být spojitě (jsou v něm obsaženy elektromagnetické vlny všech vlnových délek z daného intervalu), čárové (obsahuje jen některé vlnové délky, tzv. spektrální čáry) nebo pásové (je tvořeno velkým množstvím spektrálních čar ležících v těsné blízkosti). [5]



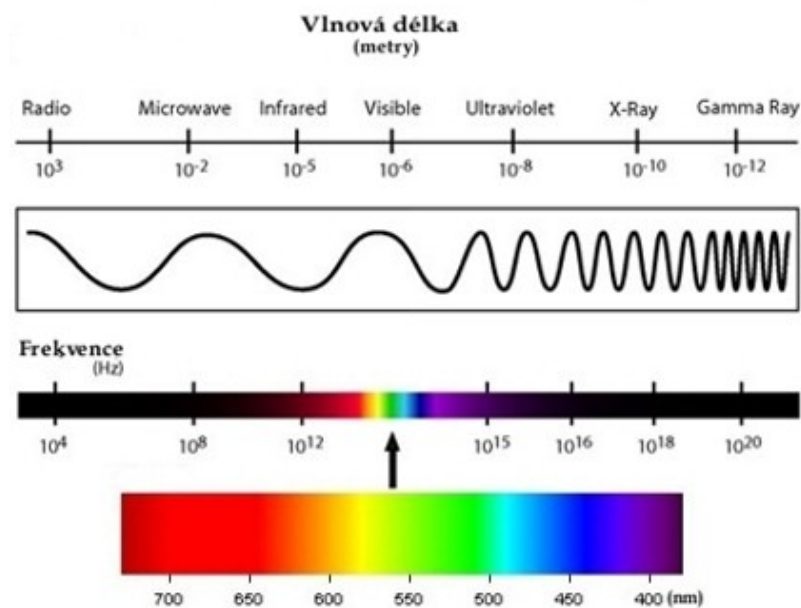
Obrázek 2: Spojité (a), čárové (b) a pásové (c) spektrum záření [18]

2.1 Rozdělení spektra optického záření

Spektrum optického záření se dělí na tři pásma – oblast infračerveného záření, viditelného záření (světla) a ultrafialového záření. [5]

Tabulka 1: Charakteristiky jednotlivých druhů záření [5]

Druh elektromagnetického záření	Frekvence [Hz]	Vlnová délka [nm]	Energie [eV] $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Infračervené záření	$3 \cdot 10^{11} - 3,9 \cdot 10^{14}$	$10^6 - 760$	$10^{-2} - 10^0$
Viditelné světlo	$3,9 \cdot 10^{14} - 7,9 \cdot 10^{14}$	$760 - 380$	$1 - 3,1$
Ultrafialové záření	$7,9 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	$380 - 1$	$3,1 - 10^2$



Obrázek 3: Spektrum optického záření [19]

2.1.1 Infračervené záření

Frekvence tohoto záření leží pod úrovní kmitočtu červeného světla, odtud plyne označení infračervené (infrared, IR).

Spektrum IR záření se dělí na několik podintervalů, a to na IR - A (krátkovlnné pásmo s rozmezím vlnových délek 760 až 1400 nm), IR - B (střední pásmo s rozmezím vlnových délek 1400 až 3000 nm) a IR - C (dlouhovlnné pásmo vlnovou délkou nad 3000 nm). Pásmo IR - C následně přechází bez ostré hranice do oblasti velmi krátkých radiových vln.

Sluneční záření je IR zářením tvořeno z přibližně 60 %.

[4], [5], [7]

2.1.2 Viditelné záření (světlo)

Vlnová délka viditelného záření se pohybuje v rozmezí od 380 do 760 nm. Tato oblast je jako jediná viditelná lidským okem.

Barva viditelného světla je dána jeho vlnovou délkou. Čím je tato délka kratší, tím je vyšší frekvence a energie fotonů. Nejkratší vlnovou délku má světlo jevící se jako fialové, nejdelší červené (viz. Obrázek 3). Bílé světlo obsahuje všechny barvy spektra. Za monochromatické (monofrekvenční) je světlo považováno tehdy, má-li konstantní vlnovou délku, resp. frekvenci.

Sluneční svit, dopadající na zemi, tvoří viditelné záření z asi 39 %.

[1], [4], [5], [7]

2.1.3 Ultrafialové záření

Ultrafialové (ultraviolet, UV) záření je další složkou optického spektra, kdy vlnová délka nepřesahuje 380 nm. Název je odvozen od frekvence, která leží nad kmitočtem fialového světla.

UV záření se dále dělí se na tyto pododdíly: UV - A (dlouhovlnné pásmo s rozmezím vlnových délek od 315 do 380 nm, bývá rovněž označováno jako tzv. pásmo černého světla), UV - B (středovlnné pásmo s rozmezím vlnových délek od 280 do 315 nm) a UV - C (krátkovlnné pásmo, jenž zahrnuje vlnové délky pod 280 nm).

Sluneční záření je UV pásmem tvořeno přibližně z 1 %. Záření typu UV - C ale již není součástí dopadajícího svitu, jelikož je absorbováno ozonem a kyslíkem.

[1], [5], [7], [8]

3 Optika

Optika je nauka o optickém záření (především světle). Zabývá se zákonitostmi při jeho šíření a fyzikálními ději při vzájemné interakci záření a látky, na kterou světlo dopadá. [5]

3.1 Vlnové vlastnosti světla

Světlo je elektromagnetické vlnění, na které je lidské oko citlivé. Jeho frekvence se nachází v rozmezí $3,9 \cdot 10^{14}$ až $7,9 \cdot 10^{14}$ Hz a vlnové délky v intervalu od 380 do 760 nm.

Vlnová délka λ je dána vzdáleností mezi dvěma maximy vlny. Je udávána v metrech [m].

Frekvence světla f je dána počtem maxim vlny, jež připadají na jednu sekundu vyzařování. Jednotkou této veličiny je hertz [Hz].

Rychlost šíření světla ve vakuu má hodnotu $c = 299\,792\,498 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato rychlost je maximální, a v jiných prostředích je vždy nižší. Poměr rychlosti šíření světla ve vakuu a v jiném prostředí se nazývá **index lomu** optického prostředí:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Všechny výše zmíněné veličiny lze uvést ve vzájemném vztahu:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

[1], [5], [4]

3.2 Šíření světla

Světlo se od zdroje šíří po vlnoplochách, a každý bod této vlnoplochy je zdrojem elementárního vlnění (Huyghensův princip). Směr šíření je dán světelným paprskem, což je ve své podstatě přímka, která je na vlnoplochu kolmá. [5], [12]

Při dopadu světla na rozhraní dvou optických prostředí nastává odraz (reflexe) a lom (refrakce). [12]

3.2.1 Zákon odrazu

Podle tohoto zákona je úhel odrazu α roven úhlu dopadu α' a odražený paprsek leží v rovině dopadu. [12]

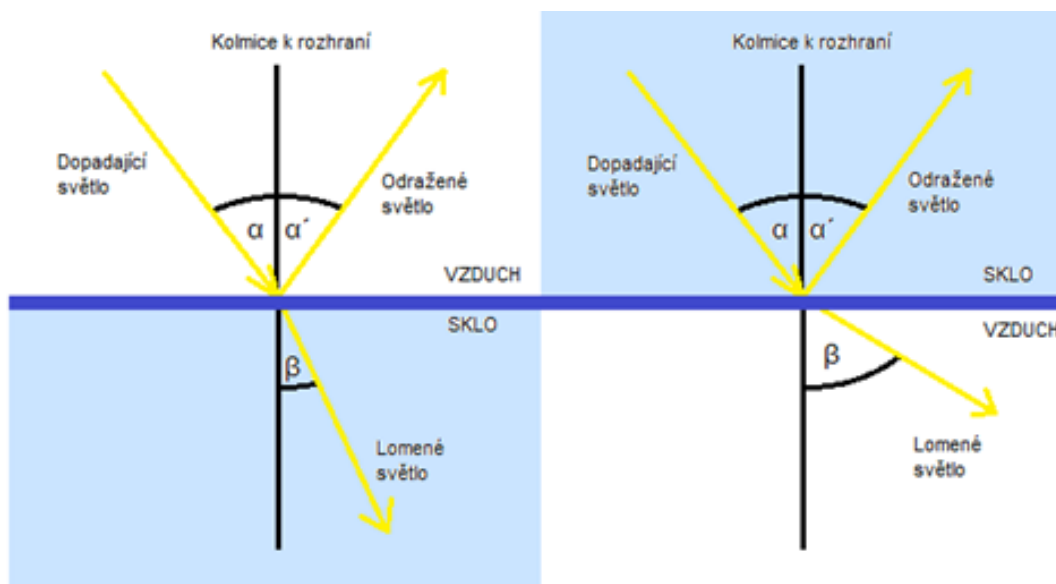
3.2.2 Zákon lomu (Snellův zákon)

Prochází-li paprsek z prostředí s indexem lomu n_1 do prostředí s indexem lomu n_2 , dochází k lomu paprsku. Pokud úhel dopadu značíme α a odrazu β , pak platí:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Prostředí s vyšším indexem lomu je označováno jako opticky hustší, a naopak prostředí s nižším indexem jako opticky řidší.

Při šíření světla z prostředí opticky řidšího do hustšího nastává **lom ke kolmici**. V opačném případě, kdy světlo postupuje z prostředí hustšího do řidšího, nastává **lom od kolmice**.



Obrázek 4: Nalevo - lom ke kolmici ($\beta < \alpha$), napravo - lom od kolmice ($\beta > \alpha$)

Zvláštní případ lomu od kolmice ($n_1 > n_2$) nastává pro $\beta = 90^\circ$. Úhel dopadu α_m , kterému odpovídá tento úhel lomu, se nazývá mezní úhel. Pro něj platí:

$$\sin \alpha_m = \frac{1}{n} \quad (4)$$

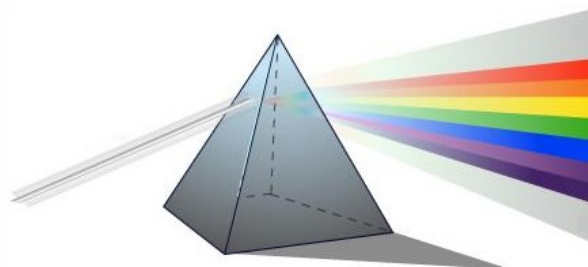
Je-li $\alpha > \alpha_m$, vzniká **úplný odraz**, lom tedy vůbec nenastává.

[5], [12]

3.2.3 Disperze

Světla různých frekvencí (tedy i barev) se ve stejném prostředí šíří různou rychlostí a mají různé indexy lomu, vlivem kterých se odlišně lámou. Tento jev se nazývá disperze. V bílém světle jsou zastoupena světla všech barev, takže jeho rozkladem vznikne barevné spektrum. Tato získaná monochromatická světla již dále rozkládat nelze. K provedení disperze se používají optické hranoly.

[5], [12]



Obrázek 5: Disperze světla optickým hranolem [20]

3.3 Kvantová optika

Kvantová optika se zabývá ději při emitování a šíření záření, a ději při vzájemné interakci záření a látky.

Podle kvantové teorie lze elektromagnetické vlnění popsat jako proud fotonů, neboli elementárních kvant elektromagnetické energie. Záření tedy není spojitě. Fotony jsou nelátkové povahy (bosony), takže je nelze vnímat smysly, ale je možné jejich existenci dokázat experimentálně. Jejich klidová hmotnost je nulová a pohybují se rychlostí světla c .

Každý foton má svou **energii** E [J] a **hybnost** p [$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], pro které platí následující vztahy.

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (5)$$

$$p = m \cdot c = \frac{h}{\lambda} \quad (6)$$

h vyjadřuje Planckovu konstantu ($h = 6,626075 \cdot 10^{-34}$ J·s), f je frekvence záření, λ vlnová délka záření, c rychlost světla ve vakuu ($c = 300\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) a m hmotnost fotonu.

K nejvýznamnějším jevům kvantové optiky patří **fotoelektrický jev**, který nastává po ozáření pevných látek (kovů nebo polovodičů) vhodnou frekvencí. Při vnějším fotoelektrickém jevu se působením záření uvolňují elektrony z povrchu látky a nastává fotoemise elektronů. Při vnitřním fotoelektrickém jevu vzniká, zejména u polovodičů, jejich fotovodivost.

[5], [12]

3.4 Vlnová optika

3.4.1 Interference světla

Projevem vlnových vlastností světla, zejména monochromatického, je skládání vlnění (interference). Dvě elektromagnetické vlny, které se zároveň setkají v určitém bodě, interferují, to znamená, že se sčítají okamžité hodnoty jejich elektrických a magnetických složek.

Podmínkou vzniku interference je, aby světla z různých zdrojů měla v daném místě stejnou fázi, která se s časem nemění, čili aby byla koherentní. U přirozených zdrojů se vlastnosti světla nezmění jen na velmi krátké vzdálenosti, proto je potřeba využívat zdrojů umělých.

[5], [12]

3.4.2 Difrakce

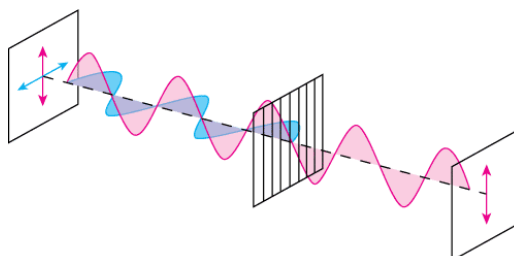
Difrakce (ohyb světla), je jev, při kterém se vlnění dostává do oblasti geometrického stínu za předmětem. Lze ji pozorovat tehdy, když světlo prochází štěrbinou, jejíž šířka je srovnatelná s jeho vlnovou délkou. Za štěrbinou se na stínítku objeví difrakční obrazce (světlé a tmavé pruhy).

[5]

3.4.3 Polarizace světla

Světlo šířící se v prostoru je postupné příčné elektromagnetické záření. Jde tedy o kmitání vektoru intenzity elektrického pole E a vektoru indukce magnetického pole B . Vektor elektrické intenzity E je přitom vždy kolmý na směr, kterým se vlnění šíří. Směr vektoru magnetické indukce B je kolmý jak na směr šíření vlnění, tak na vektor E . Vektor intenzity elektrického pole E v případě nepolarizovaného světla mění zcela náhodně svůj směr. V případě lineárně polarizovaného světla kmitá vektor E neustále v jedné rovině.

[5], [12], [13], [14]



Obrázek 6: Polarizace světla polaroidem [21]

4 Zdroje záření

Zdroje optického záření jsou objekty, v nichž dochází k přeměně různých forem energie na energii elektromagnetického záření v optické oblasti spektra. Existují přirozené i umělé zdroje záření. Mezi hlavní přirozený zdroj patří Slunce, které navíc svým zářením pokrývá celé spektrum. Umělé zdroje vždy pokrývají jen určitou část optického spektra, a dělí se na tepelné (vlnová délka záření závisí na teplotě zdroje a jeho spektrum je spojité; teplotním zdrojem je každé těleso, jehož teplota je vyšší než 0 K) a luminiscenční (využívají excitačních pochodů v atomech a molekulách, spektrum může být čárové). Podle vlastností emitovaného záření se dále umělé zdroje dělí na koherentní (lasery) a nekoherentní. [12], [9]

4.1 Žárovky

Žárovky patří mezi tepelné zdroje záření. Skládají se ze skleněné baňky naplněné vakuem, popř. inertním plynem, a rozžhaveného wolframového vlákna. Klasická žárovka má pro viditelnou oblast spektra malou účinnost. Větší účinnosti dosahují halogenové žárovky, které jsou naplněny směsí inertního plynu a halogenu (jódu nebo bromu). Při vysoké teplotě se wolfram odpařuje a následně reaguje s halogenem. Při rozpadu vzniknuvších sloučenin rovněž vzniká světelné záření, a tím se účinnost zvyšuje. [12]

4.2 Luminiscenční zdroje záření

U luminiscenčních zdrojů se využívá, jak již samotný název napovídá, jevu luminiscence plynů nebo pevných látek, který v nich vzniká například průchodem elektrického proudu. Látky schopné luminiscence se nazývají luminofory. Jejich emisní spektrum je diskrétní.

Proces luminiscence začíná vybuzením částice (iontu nebo molekuly) ze základního stavu do excitovaného. Následně pokračuje přenosem excitační energie na jinou částici nebo přechodem na nižší energetickou hladinu, a končí vyzářením kvanta energie. K luminiscenci dochází i při nízkých teplotách, proto bývá někdy označována jako studené světlo. Podle formy budící energie se dělí na fotoluminiscenci, radioluminiscenci, katodoluminiscenci a chemiluminiscenci. [12]

4.2.1 Výbojky

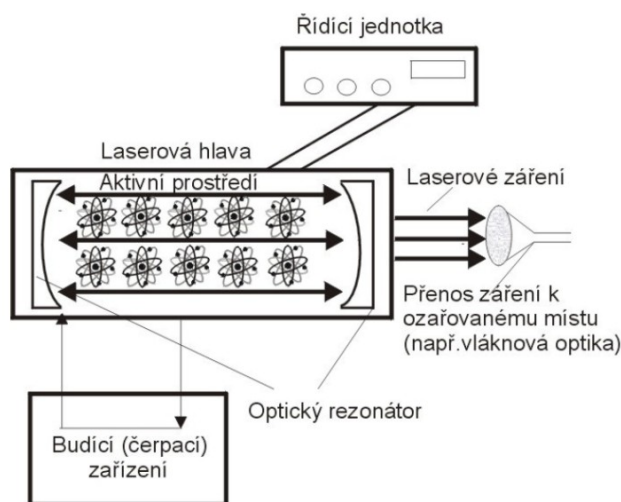
Výbojky patří mezi luminiscenční zdroje záření. Skleněná nebo křemenná trubice s elektrodami na obou koncích je naplněna plynem nebo parami kovů. Po přivedení dostatečného elektrického napětí na elektrody se začnou volné elektrony v trubici pohybovat od katody k anodě a jejich nárazy excitují nebo ionizují další atomy plynu. Při přechodu elektronů atomů nebo iontů plynu z excitovaných stavů do stavů s nižší energií je pohlcená energie vyzářena. [12]

4.3 Lasery

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je zdroj elektromagnetického záření, který využívá jevu stimulované emise záření aktivními částicemi (atomy, molekulami, ionty, elektrony), buzenými vnějším zdrojem energie. Laserové záření vzniká přeměnou některého druhu energie (např. elektrické, optické či chemické) na záření, které se vyznačuje tím, že je koherentní, monochromatické, polarizované, nedivergentní a velmi intenzivní. Lasery mohou emitovat záření typu gama (grasery), ale i rentgenové, UV, viditelné, IR nebo mikrovlnné (masery). [12]

Laser se skládá z **aktivního prostředí** (pevná látka, polovodič, kapalina nebo plyn), **optického rezonátoru**, který je tvořen zrcadly (jedním reflexním a druhým polopropustným), a **zdroje budící energie** (zdroje proudu elektronů, výbojky, laseru či chemické reakce). [12]

Základním mechanismem funkce laseru je střídání excitace a deexcitace. Elektrony aktivní látky jsou vnějším zdrojem energie převedeny ze základní energetické hladiny na vyšší energetickou hladinu. Poté jsou excitované elektrony dodaným stimulačním fotonem deexcitovány, a při tomto jevu vznikají další fotony stejných parametrů, jako měl původní stimulační foton. Tento proces se děje lavinovitě. Světlo se takto nejen zesiluje, ale vystupující svazek má všechny vlastnosti typické pro laserové záření, které může být emitováno kontinuálně nebo v impulzech. [12], [9]



Obrázek 7: Schéma laseru [12]

4.4 LED

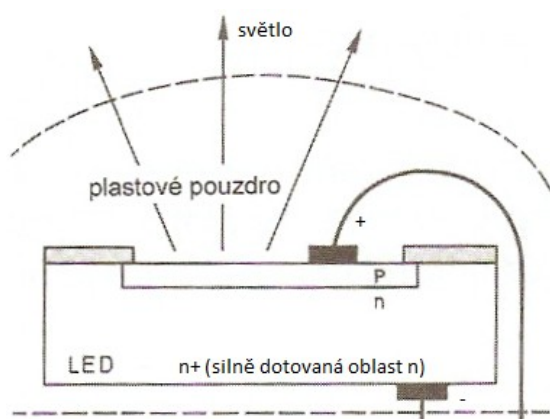
LED (Light Emitting Diode) patří mezi polovodičové součástky emitující světlo. Skládají se z vrstvy P a vrstvy N, které ale nejsou příslušnými náboji stejně dotovány. N je oproti P dotována velmi silně, čímž se dosáhne toho, že proud diodou v propustném směru zprostředkovávají téměř výhradně elektrony (z N do P protéká podstatně větší množství elektronů, než děr z P do N). Elektrony se následně v P slučují s přítomnými děrami, a při této rekombinaci dochází k emisi fotonů (k přeměně

elektrické energie na světelnou). Vrstva P je mnohem tenčí než N a PN přechod leží těsně pod povrchem diody. Vzniklé fotony pak mohou být snadno vyzařovány směrem ven. Aby na rozhraní mezi polovodičovým materiálem a vzduchem nedocházelo ke značným odrazům, umisťuje se vyzařovací plocha do plastového pouzdra.

Vlnová délka, a tím i barva emitovaného záření, je závislá na výrobním materiálu. Existují LED červené, žluté, zelené, modré a infračervené. Ve všech případech je spektrum soustředěno do velmi úzkého pásma, proto jsou LED považovány za monochromatické zářiče.

Standardně se LED zapojují do série s předřadným odporem. V rozsahu, ve kterém dioda pracuje, je možné napětí považovat za konstantní, proto je spotřebovaná energie prakticky jen funkcí proudu. Z tohoto důvodu je obvykle dioda napájena proudovým zdrojem. Tento zdroj může pracovat na základě PWM (pulsně šířková modulace), kdy budou diodou protékat krátkodobé impulzy proudu. Vzhledem k tomu, že frekvence impulzů je veliká, lidskému oku se LED jeví, jakoby neustále svítila, ale zároveň se zbytečně nepřehřívá. Jas diody se mění nastavováním střídry (poměr délky pulzu k délce celkové periody v procentech).

[35], [36]



Obrázek 8: Konstrukční provedení LED [35]

5 Fototerapie

Fototerapie je léčebná metoda, která využívá pozitivních účinků optického spektra elektromagnetického vlnění na lidský organismus. Odvětvím fototerapie je helioterapie, která k léčbě využívá výhradně slunečního svitu. Oficiálně uznávanou léčebnou metodou se fototerapie stala až zásluhou dánského lékaře Nielse Ryberga Finsena. Ten založil roku 1896 v Kodani Ústav pro terapii světlem. V roce 1903 získal za svou práci dokonce Nobelovu cenu. [1], [37]

5.1 Faktory ovlivňující účinnost fototerapie

Biologické a fyziologické účinky optického záření závisí na energii fotonů, intenzitě záření, dávce záření, absorpční vlastnosti tkáně a reaktivitě organismu.

Energie fotonu je nejmenší možné množství (kvantum) energie, které je látka schopna vyzařit, popřípadě pohltit. Udává se v joulech.

Intenzita záření představuje množství energie, které dopadá kolmo na ozařovanou plochu. Intenzita klesá se čtvercem vzdálenosti, to znamená, že při zvětšení vzdálenosti mezi zdrojem a povrchem těla pacienta na dvojnásobek, klesne intenzita záření na jednu čtvrtinu původní hodnoty. Tento zákon platí pouze pro bodový vyzařovací zdroj. Plošné zdroje záření mají svůj vlastní vyzařovací diagram udávaný výrobcem. Jednotkou intenzity je watt na m^2 .

Dávka záření je dána součinem intenzity záření a doby expozice.

Absorpční vlastnost tkáně je její schopnost pohlcovat záření. Často je vyjadřována takzvanou polopropustnou vrstvou, tedy šířkou tkáně, jež polovinu intenzity záření absorbuje a polovina intenzity záření jí projde - zeslabí původní záření na 50 %.

Reaktivita organismu souvisí s fyzickým, ale i psychickým stavem ozařovaného pacienta.

[1], [5], [4]

5.2 Účinky a aplikace viditelného záření (světla)

Viditelné záření působí na organismus různými mechanismy. Kladně ovlivňuje lidskou psychiku, působí na periodicitu životních funkcí a má tepelné a analgetické účinky. Modré světlo se používá pro fototerapii v neonatologii, protože podporuje rozklad bilirubinu při novorozenecké žloutence. Existují ovšem i jedinci, u kterých následkem viditelného záření vznikají různá patologická onemocnění, zejména fotodermatózy (solární kopřivka, fototoxické reakce, apod.). Ty jsou důsledkem fotochemických reakcí, které jsou zapříčiněny působením modrého nebo fialového světla na pokožku. Červená oblast, blíží se IR záření, se projevuje tepelnými účinky, jež mohou vyvolat přehřátí organismu. [8], [12]

5.3 Účinky a aplikace infračerveného záření

Energie IR záření není velká, proto je absorbována kůží (nejhlouběji prostupuje IR o vlnových délkách 900 nm) a po proniknutí do příslušných míst se energie fotonů přemění na energii tepelnou. Teplo má vasodilatační, spasmolytický a analgetický účinek. Po aplikaci vzniká tzv. skvrnitý erytém. Ten obvykle vymizí do několika minut.

Při dlouhodobém působení IR záření na lidský organismus se ale mohou projevit i vedlejší účinky - přehřátí organismu (hypertermie) nebo dokonce vznik popálenin. IR může rovněž poškodit oko, protože v pásmu 760 až 2500 nm se vyskytují tzv. penetrující paprsky, které procházejí okem a jsou absorbovány duhovkou, čočkou a sítnicí.

Ozařování IR zářiči patří mezi doplňkovou léčbu, a to například při bolestech svalstva nebo kloubů, při neuralgiích, bronchiálním astmatu, apod. IR záření dále příznivě ovlivňuje rychlost absorpce exudátu u zánětlivých procesů. Délka doby ozařování bývá obvykle v rozmezí 10 až 15 min.

Pro terapii je nejčastěji využíváno záření typu IR - A, jelikož není pohlcováno vodou, a je tak schopno proniknout do podkoží, kde tato místa prohřívá. Od kůže se odráží asi 30 % pásma. Mezi umělé zdroje tohoto záření patří například žárovky s vodním filtrem (aquasoly), jež vyliminují záření typu IR - B i IR - C.

Záření typu IR - B je již vodou pohlcováno, ale proniká sklem. Od kůže se odráží jen asi 15 %, zbytek je absorbován svrchní částí kůže, a to zejména pokožkou.

Dlouhovlnné pásmo IR - C je absorbováno jak vodou, tak i sklem, proto jej nemohou produkovat chlazené zdroje, ale jen např. žhavené odporové spirály.

Nejobvyklejším umělým zdrojem IR záření vůbec je Solux (infrazářič). Jedná se vlastně o žárovku s příkonem 100 až 1000 W, kdy se vlákno rozžhaví na 2500 až 3000 °C. Při aplikaci se užívají červené nebo modré filtry. Červené filtry nejvíce propouštějí krátkovlnné pásmo (IR - A), zatímco modré středovlnné pásmo (IR - B).

[1], [4], [5], [6], [7], [12]

5.4 Účinky a aplikace ultrafialového záření

Z medicínského hlediska patří mezi pozitivní účinky UV záření zvýšení obranyschopnosti organismu, destrukce některých typů virů a bakterií (takže je využíváno ke sterilizaci a dezinfekci), produkce vasodilatačních látek, tvorba vitamínu D₃ (cholecalciferolu), zvýšení proteolytické aktivity enzymů a jejich detoxikační schopnosti, dále stimuluje růst buněk a podporuje svalovou výkonnost (díky zvýšené syntéze glykogenu z kyseliny mléčné), zvyšuje permeabilitu kapilár, snižuje glykémii (koncentraci glukózy v krvi) a hladinu cholesterolu v séru. UV záření je, podobně jako IR záření, dále využíváno k léčbě bolestivých stavů, onemocnění kůže (dermatomykóz, ekzémů, lupus vulgaris) a k urychlení hojení kožních defektů, ran a proleženin.

Negativním důsledkem přílišného ozařování může být vznik erytému, pigmentace, keratitidy, katarakty a dokonce i karcinomu kůže.

Erytém je ohraničené zčervenání kůže, které je důsledkem vasodilatace cév, zvýšené permeability kapilár a nadměrného prokrvení v místě působení záření. Objevuje se po více než jedné hodině od expozice a následně vymizí během několika dnů. Celkově je možné erytémy rozdělit do čtyř skupin. Erytém prvního stupně se neprojevuje v podstatě žádným způsobem, erytém druhého stupně je již možné rozeznat podle zřetelného zčervenání pokožky, třetí stupeň se projevuje mírnou bolestivostí a vymizí obvykle do několika dnů, kdežto bolestivost erytému čtvrtého stupně je již velmi intenzivní, stejně jako zčervenání a otok postiženého místa. Projevy nejzávažnější formy začínají ustupovat až po několika týdnech.

Pigmentace je ochranným mechanismem kůže proti UV záření, zejména UV - A, které proniká hlouběji do kůže. Následkem ozáření dojde k migraci melaninu z bazálních do povrchových vrstev kůže. Pigmentace může být přímá (vzniká ihned po opalování ztmavnutím již existujícího melaninu, nepředchází jí erytém) nebo nepřímá (předchází jí erytém, vytváří se nový melanin).

Keratitida, neboli zápal oční rohovky, se objevuje obvykle po několika hodinách od vystavení se UV svitu. Mezi projevy patří fotofobie a slzení. Vymizí obvykle do několika dnů.

Katarakta, čili šedý zákal, je následkem dlouhodobého působení UV záření na oční čočku. Projevuje se zhoršeným zamlženým viděním. Toto onemocnění je možné operativně odstranit.

Nejzávažnějším vedlejším účinkem UV záření je možný vznik karcinomu kůže. Ten je důsledkem dlouhodobého působení pásmem UV - B a UV - C, jež zapříčiní vznik mutací v kůži.

Mezi hlavní přírodní zdroj UV záření patří Slunce, ale v terapii se častěji využívá zdrojů umělých, a to zejména výbojek.

[1], [6], [8]

5.5 Léčba polarizovaným světlem

Zdroje polarizovaného světla emitují záření polychromatické (s rozsahem vlnových délek od 400 po 2000 nm), divergentní (rozbíhavé) a s nízkou energií. Výhodou léčby jsou minimální vedlejší účinky, protože terapie je pro organismus neškodná, neinvazivní a nebolestivá.

Polarizované světlo podporuje reparační procesy ve tkáních, a syntézu proteinů a kolagenu. Dále zlepšuje semipermeabilitu membrán, čímž se normalizuje osmotický tlak a dochází k ústupu edémů a zánětů.

Vzhledem k nižšímu výkonu zářičů je, oproti laserům, nezbytné prodloužit dobu aplikace. Také hloubka průniku záření do tkáně je nižší. Mezi typické zdroje polarizovaného světla patří různé druhy biolamp. Tyto přístroje jsou ideální pro domácí léčení kožních onemocnění (zánětlivá onemocnění kůže, ekzémy, lupénka, bércové vředy, proleženiny, popáleniny, jizvy, atd.).

[1], [12]

5.6 Laseroterapie

Lasery pro laseroterapii jsou konstruovány buď pro bodovou aplikaci, kde je paprsek veden do úzké sondy, anebo v podobě scannerů. S ohledem na průchodnost tkání se lasery o vlnové délce 627 až 780 nm využívají spíše v dermatologii, gynekologii a stomatologii, a lasery o delších vlnových délkách v rehabilitaci a v neurologii. [12]

5.6.1 Účinky laserového záření

Biologické účinky laserového záření lze rozdělit na tepelné a netepelné.

Tepelné účinky závisí na výkonu a vlnové délce laserového záření, a nejvíce se jich využívá při chirurgických aplikacích.

Netepelné účinky převažují u laserů s nízkým výkonem a jsou málo závislé na vlnové délce. Podstata těchto účinků je na molekulární úrovni. Laserové záření působí především na mitochondrie. Dochází ke zvýšené replikaci mitochondriální DNA a ke zrychlení její syntézy. Laserové záření též zvyšuje aktivitu některých enzymů a ovlivňuje elektrický potenciál buněčných membrán.

Dále je znám fotodynamický účinek laserového záření, kterým se rozumí změna chemické struktury látky po ozáření. [9]

5.6.2 Dělení laserů podle výkonu

Podle výkonu světelného paprsku se lasery dělí na neinvazivní (terapeutické s výkonem do 0,5 W) a invazivní (chirurgické s výkonem nad 1 W). [12]

5.6.2.1 Terapeutické lasery

Mezi hlavní účinky terapeutického laserového záření patří stimulace biologických procesů a analgetický účinek. Stimulace biologických procesů probíhá na humorální úrovni (ovlivňuje homeostázu a úroveň pH, zasahuje do tvorby ATP, podporuje tvorbu neurotransmitérů), membránové úrovni (zvyšuje metabolismus buněk a podporuje transmembránový přenos, aktivuje Na-K pumpu a zvyšuje membránový potenciál), buněčné úrovni (stimuluje mitózu, zvyšuje aktivitu fagocytů, leukocytů, makrofágů, imunoglobulinů a fibroblastů) a tkáňové úrovni (podporuje vasodilataci, zlepšuje resorpci edémů a zvyšuje tvorbu kolagenu). Analgetický účinek laseru může být lokální (zvýšením prahu dráždivosti) nebo celkový (zabezpečený zvýšeným uvolňováním serotoninu). [1]

5.6.2.2 Chirurgické lasery

Chirurgické lasery jsou využívány k invazivním zákrokům. V místě absorpce paprsku laseru o vysokém výkonu dochází k nahromadění značného množství energie. Světelná energie se transformuje na energii tepelnou a mechanickou a může vyvolat i chemickou reakci.

V závislosti na energii paprsku, délce doby působení a vlnové délce dochází k různým interakcím laseru a tkáně, jejichž výsledkem je:

- Fotokoagulace – využívá se při výkonech v bohatě prokrvených tkáních, kde dochází k destrukcím buněk následkem fotochemických reakcí
- Vaporizace – používá se pro odpaření příslušné tkáně, ve které dojde k lokálnímu zvýšení teploty nad 100 °C
- Fotochemická ablace – tzv. čistý řez
- Roztržení – působením laseru dojde ve tkáni k prudkému zvýšení teploty, a tedy i tlaku, jehož následkem je devastace tkáně
- Fotochemické interakce – ozařovaná tkáň přednostně vychytává fotosenzibilizující látku, podanou nitrožilně, následně je ozářena laserem – tato terapie je využívána především při léčbě nádorů

[12]

6 Návrh měřicího pracoviště

6.1 Spektrofotometr

Spektrofotometrie je disciplína zabývající se měřením intenzity záření v rozsahu ultrafialového, viditelného, blízkého infračerveného a infračerveného spektra, a to prostřednictvím spektrofotometru. Využívá se například při určování barev objektů, měření koncentrace chemických složek v látce nebo při stanovování parametrů zdrojů záření. [23]

6.1.1 Konstrukce spektrofotometru

Spektrofotometrický přístroj se skládá z optického monochromátoru a detektoru. Záření je z místa měření do přístroje přenášeno nízkoabsorpčním křemičitým optickým vláknem. [23]

6.1.1.1 Optický monochromátor

Hlavním komponentem spektrofotometru je optický monochromátor, nejčastěji typu Czerny - Turner. Ten je složen ze vstupní štěrbinou, kolimátoru, disperzního prvku (mřížky nebo hranolu) a zaměřovací optiky.

Záření do monochromátoru vstupuje štěrbinou, a poté dopadá na sférické zrcadlo, které svazek kolimuje na rovinnou difrakční mřížku. Mřížka je rozptylovacím prvkem, na němž se záření rozloží a následně odrazí pod různými úhly pro jednotlivé vlnové délky. Poté je záření zachyceno druhým sférickým zrcadlem, které svazky fokusuje na jednorozměrné pole lineárního detektoru (ten samotný již součástí monochromátoru není).

[23], [24]



Obrázek 9: Optický monochromátor typu Czerny - Turner [23]

6.1.1.1.1 Mřížka

Difrakční mřížka je optický prvek, který rozkládá polychromatické záření na jednotlivé vlnové délky. Mřížka je tvořena řadou rovnoměrně rozložených paralelních drážek, formovaných na reflexní vrstvě. Drážky mohou být vytvářeny pomocí laseru (vznikají tzv. holografické mřížky), respektive diamantu (ryté mřížky). U spektrofotometrů jsou využívány oba tyto typy.

Optické rozlišení spektrofotometru je definováno jako minimální změna vlnové délky záření, kterou může přístroj rozeznat, a je závislé právě na vlastnostech mřížky. Čím lépe je mřížka schopna rozložit záření na jednotlivé vlnové délky, tím lepší bude rozlišovací schopnost přístroje.

Míra rozlišení je dále ovlivňována šířkou světelného paprsku vstupujícího do spektrometru. Ta je dána velikostí vstupní štěrby nebo průměrem jádra optického vlákna. Štěrbiny mohou být 10, 25, 50, 100 nebo 200 μm široké a 1000 μm vysoké, popř. 500 μm široké a 2000 μm vysoké. Zde platí, že čím užší svazek záření do zařízení vstupuje, s tím větší přesností jsme schopni jej analyzovat.

U spektrometrů je rozlišení udáváno v nm.

[23]

6.1.1.2 Detektorová pole

Spektrofotometry mohou být vybaveny různými typy detekčních polí. V současné době se pro rozsah 200 - 1100 nm používají CCD detektory na křemíkové bázi, černé ztenčené CCD, CMOS nebo pole fotodiod. Pro rozsah NIR (1000 - 2500 nm) se implementují pole InGaAs.

Nejčastěji se využívá detektorů typu CCD (Charge Coupled Device - zařízení s vázanými náboji), které jsou založeny na fotoefektu - fotony dopadajícího záření vyřazují z křemíkové destičky elektrony a převádějí je do excitovaného stavu. Na konci daného časového intervalu (integračního času) je náboj převeden do vyrovnávací paměti a následně do A/D převodníku. Hlavní výhodou CCD je velké množství pixelů (2048 nebo 3648), a také vysoká citlivost a rychlost.

[23]

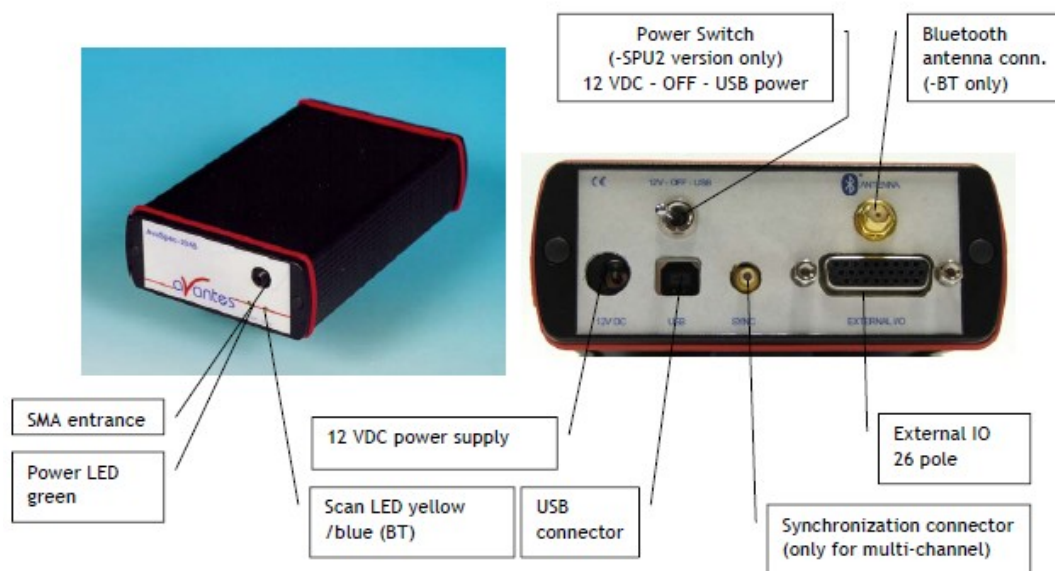
6.1.2 Spektrofotometr AvaSpec-2048 Standard Fiber Optic

AvaSpec - 2048 je optovláknový standardní spektrofotometr s 8 kanály. Jeho hlavní součástí je monochromátor AvaBench - 75, postavený na koncepci Czerny - Turner. Dále obsahuje 2048 pixelový CCD detektor, vstupní konektor pro optické vlákno, kolimační a zaostřovací zrcadlo a difrakční mřížku. Difrakční mřížky s různým rozptylem umožňují měření v rozsahu 200 až 1100 nm. Dále se skládá z 16 bitového A/D převodníku. Spektrofotometr komunikuje s ovládacím programem rozhraním USB 2.0 nebo prostřednictvím Bluetooth. AvaSpec - 2048 je vhodný zejména pro měření nízkých úrovní osvětlení s vysokým rozlišením. Digitální I/O porty umožňují přivedení vnějšího triggeru (spouštěče). Přístroj lze napájet pomocí USB proudem 350 mA nebo externím zdrojem SPU2 (12 VDC, 350 mA).

[23]

Tabulka 2: Technické údaje AvaSpec - 2048 - USB2 [23]

Název parametru:	Vlastnosti:
Monochromátor	Czerny - Turner, ohnisková vzdálenost 75 mm
Rozsah vlnových délek	200 - 1100 nm
Rozlišení	0,04 - 20 nm, závisí na nastavení
Rozptyl světla uvnitř přístroje	< 0,1 %
Citlivost	16bitový ADC
Detektor	CCD lineární detektor, 2048 pixelů
Signál/šum	200:1
A/D převodník	16 bitů, 2MHz
Integrační čas	1,1 ms - 1 min.
Rozhraní	USB 2.0, RS - 232
Vzorkovací rychlost	1,11 ms/scan
Rychlost přenosu dat	1,8 ms/scan (USB 2.0) 430 ms/scan (RS - 232)
Digitální I/O	HD - 26pinový konektor: 2 analogové vstupy, 2 analogové výstupy, 3 digitální vstupy, 12 digitálních výstupů, trigger, sync.
Napájení	Výchozí USB, 350 mA, nebo SPU2 externí 12 VDC, 350 mA
Rozměry, hmotnost	175 × 110 × 44 mm, 716 g
Mřížka	600 vrypů/mm



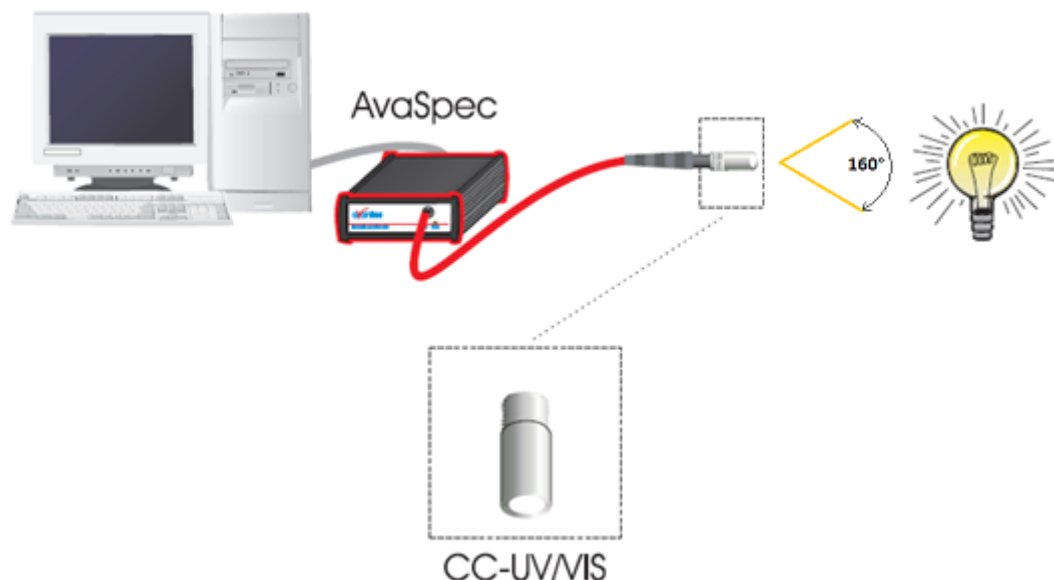
Obrázek 10: Spektrofotometr AVANTES AvaSpec - 2048 - USB2 [25]

6.2 Měřicí pracoviště

6.2.1 Měřicí pracoviště pro spektrofotometrická měření

Škála možností využití spektrofotometru je velice široká, ale pokud je cílem měření určení vlastností optického záření, skládá se měřicí pracoviště z počítače, spektrofotometru s optickým vláknem a kosinovým korektorem (jeho funkcí je zachycování paprsků pod úhlem 160°), a zdroje záření (viz. Obrázek 11).

Aby bylo měření přesnější, mělo by být prováděno v temné komoře, tubusu nebo v integrační sféře. Tubus je ve své podstatě dutý válec se dvěma vstupy - jedním pro kosinový korektor a druhým pro měřený zdroj. Jeho hlavním úkolem je zajistit temné prostředí při měření. Integrační sféra je oproti tomu dutým kulovitým tělesem, opatřeným dvěma porty - opět jedním pro kosinový korektor a druhým pro světelný měřený zdroj. Ve sféře vzniká prostředí blížící se absolutní tmě, a navíc je „vystlána“ řadou reflexních prvků, které zajistí přivedení rozptýlených svazků záření na kosinový korektor. [38]



Obrázek 11: Měřicí pracoviště pro stanovování spektrálních charakteristik, radiometrických, fotometrických a kolorimetrických veličin. [25]

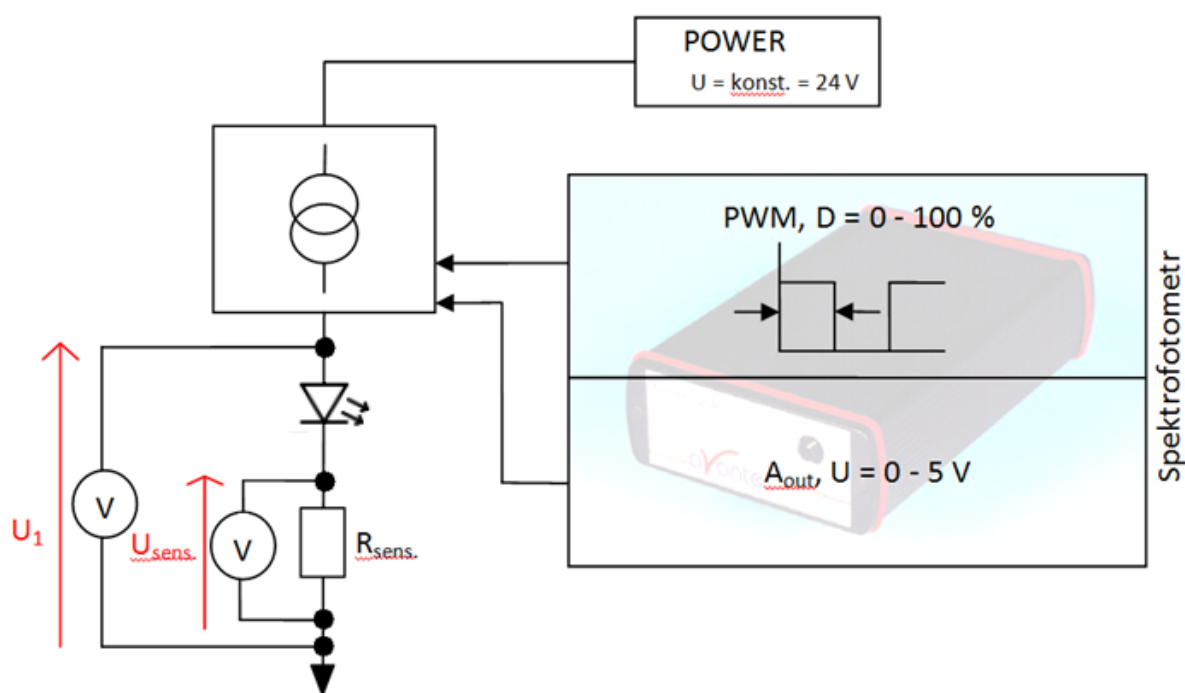
Před každým měřením by měla být nejprve provedena kalibrace (viz. 7.2.2 Kalibrace). Po ní je již možné zahájit samotné měření. Uživatel zadá, jaký rozsah vlnových délek chce pro daný světelný zdroj sledovat, integrační čas, a další parametry (viz. 7.2.1 Start panel). Software následně sám vykreslí graf spektrální charakteristiky (viz. 7.2.3 Graf) a dopočte radiometrické, fotometrické a kolorimetrické veličiny (viz. 7.2.4 Měření).

6.2.2 Měřicí pracoviště s řízeným napájením LED

Spektrofotometr Avantes je vybaven 26pinovým konektorem, který, mimo jiné, obsahuje dva analogové výstupy a šest výstupů pro PWM (pulsně šířkovou modulaci), a právě tyto výstupy mohou být využity pro řízení napájecího proudového zdroje LED. Pak by měřicí pracoviště obsahovalo spektrofotometr, proudový zdroj, jenž by byl sám napájen zdrojem konstantního napětí, měřenou LED (případně celý řetězec diod zapojených do série) a rezistor (viz. Obrázek 12). Napětí na diodě by se následně dopočetlo podle vztahu (7), a proud by se spočetl z Ohmova zákona (8).

$$U_{LED} = U_1 - U_{SENS}. \quad (7)$$

$$I_{LED} = \frac{U_{SENS.}}{R_{SENS.}} \quad (8)$$



Obrázek 12: Měřicí pracoviště s řízeným napájecím zdrojem LED

Samozřejmě by bylo možné zkombinovat obě výše zmíněná pracoviště, a zároveň s regulací napájecího proudu LED měřit i hodnoty spektrofotometrických veličin této diody.

7 Softwarový ovladač pro spektrofotometr

Spektrofotometry firmy Avantes jsou standardně dodávány spolu s ovládacím softwarem zvaným AvaSoft. Ovšem ne vždy tento ovladač uživatelům plně vyhovuje, proto je zde ještě druhá možnost - využít DLL (dynamicky propojovaných knihoven), jež výrobce rovněž nabízí, a vytvořit si svůj vlastní program, uzpůsobený konkrétním potřebám.

DLL mohou být volány různými vývojovými prostředími, včetně LabVIEW, a obsahují některé již předem naprogramované funkce.

7.1 LabVIEW

Programovací vývojové prostředí LabVIEW (z angličtiny Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench), firmy National Instruments, umožňuje vytváření ovládacího software prostřednictvím ikon, proto je také označováno jako G-jazyk (tedy grafický jazyk). [26]

Uživatelské rozhraní vytvořeného programu představuje tzv. čelní panel (*Front panel*). Na něm se nachází indikátory (grafy, signalizační LED, atd.) a ovládací prvky (tlačítka, otočné knoflíky, stupnice, apod.).

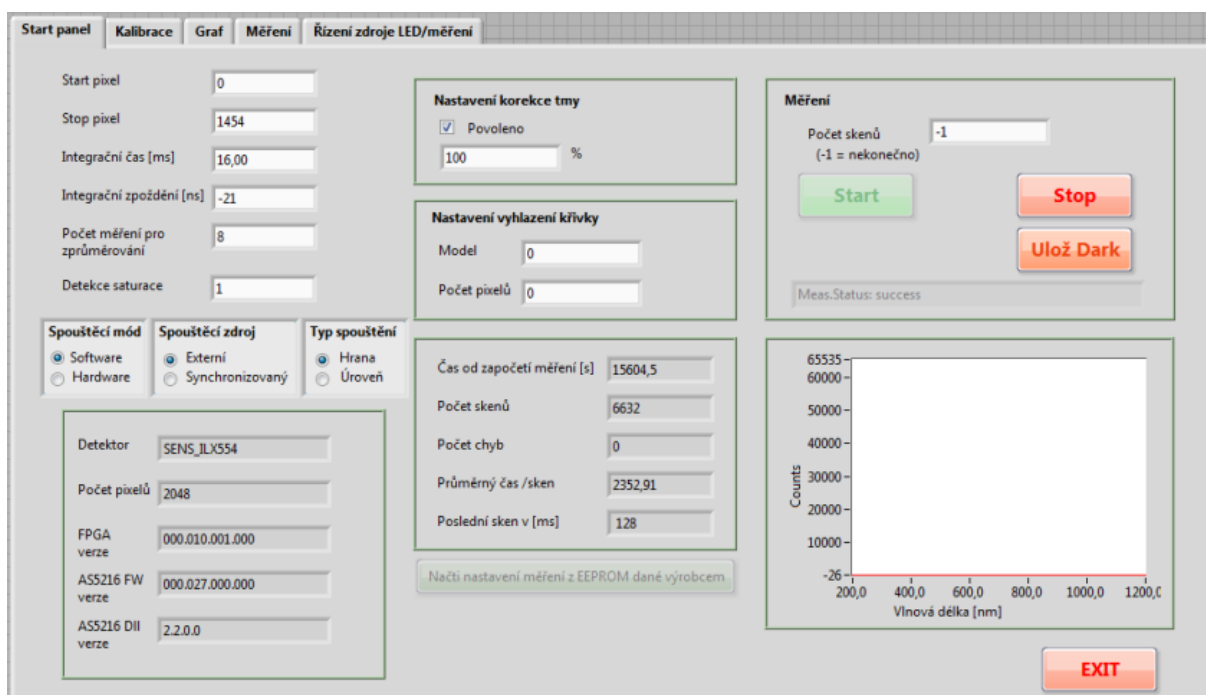
Zdrojový kód programu se definuje do tzv. blokového diagramu (*Block diagram*). Ten obsahuje nástroje pro přivedení, popřípadě vytvoření, vstupních dat, a pro jejich další zpracování (s daty je kupříkladu možné provádět různé matematické operace).

7.2 Ovládání spektrofotometru Avantes pomocí LabVIEW

Jak již bylo zmíněno, ovládací software pro spektrofotometr byl vytvářen v LabVIEW za použití DLL (tj. dynamicky propojovaných knihoven, které obsahují kódy, jež mohou být použity více programy najednou). K dispozici byla knihovna AS-5216-DLL, jež obsahovala čelní panel, a AVSIRRAD-DLL, obsahující funkce pro výpočet radiometrických, fotometrických a kolorimetrických veličin. [40]

Uživatelské rozhraní bylo vytvořeno v tzv. záložkovém formátu. Obsahuje tyto listy - *Start panel*, *Kalibrace*, *Graf*, *Měření* a *Řízení zdroje LED*.

7.2.1 Start panel



Obrázek 13: LabVIEW - Start panel

Start panel byl programován za použití DLL AS-5216, konkrétně byla využita virtuální instrumentace nazvaná AVS_Main. V rámci ní již byly vyřešeny následující záležitosti:

- Počáteční inicializace zařízení - vyhledání zařízení a zjištění obousměrné komunikace prostřednictvím USB 2.0
- Načtení vlastností zařízení - typ spektrofotometru, sériové číslo, apod.
- Umožnění uživateli zadat požadované parametry pro měření - start pixel, stop pixel, integrační čas (doba jednoho cyklu, po kterou budou fotony dopadat na CCD detektor - čím je dopadající záření intenzivnější, tím by měl být čas kratší, aby nenastala saturace detektoru), integrační zpoždění (doba, po jejímž uplynutí se započne odpočítávání integračního času), počet měření pro zprůměrování (slouží k odstranění šumu - program naměří několik cyklů, a následně ze získaných dat vypočte průměrné hodnoty, se kterými dále operuje), detekce saturace (pokud uživatel zadá 0, detekce saturace bude vypnutá, pokud 1, zapne se - tato funkce pouze spouští další aplikace, které ale nejsou v rámci balíčku DLL dostupné, takže v případě tohoto programu je detekce saturace nefunkční), spouštěcí mód, spouštěcí zdroj, typ spouštění, nastavení vyhlazení křivky - smoothing (k dispozici je pouze model 0, pokud uživatel zadá počet pixelů např. 2, budou se kromě amplitudy centrálního CCD pixelu x_n odečítat i hodnoty amplitud dvou pixelů napravo (x_{n+1} , x_{n+2}) a dvou nalevo (x_{n-1} , x_{n-2}), a z těchto 5 hodnot se následně vypočte aritmetický průměr), počet skenů a nastavení korekce tmy (funkce, která slouží k eliminaci parazitních proudů, jež vznikají na CCD detektoru samovolně i za nepřítomnosti světla, protože CCD je teplotně senzitivní - provádí se tak, že se od signálů,

naměřených na určitých pixelech, odečte signál získaný z černých (neosvětlených) pixelů detektoru, a v procentech se pak udává, v jaké míře se budou nově získaná data dále uplatňovat - při 100 % se již bude dále pracovat jen s daty získanými korekcí, ale při nastavení 70 % se bude ze zbývajících 30 % operovat stále s daty původními).

- Načtení výchozích parametrů z EEPROM
- Započítí měření
- Převod pixelů na vlnové délky [nm], a to na základě polynomu:

$$\lambda = K_0 + K_1 \cdot \text{pixnr} + K_2 \cdot \text{pixnr}^2 + K_3 \cdot \text{pixnr}^3 + K_4 \cdot \text{pixnr}^4 \quad (9)$$

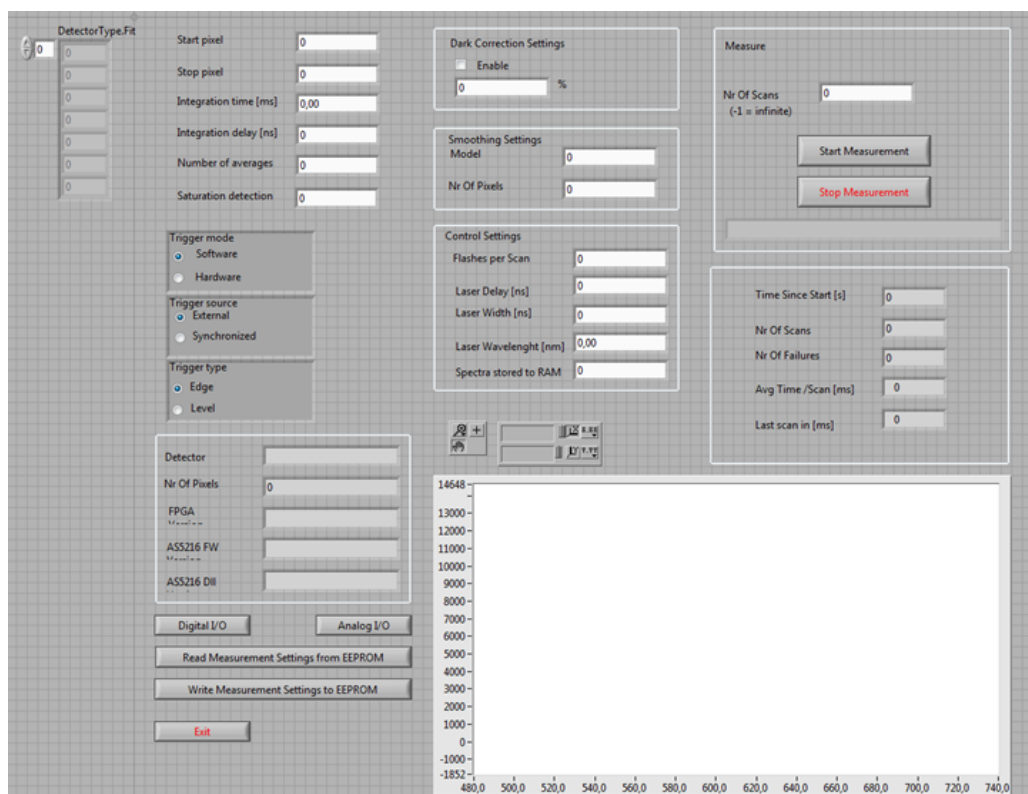
$K_0 - K_4$...koeficienty udané výrobcem

Pixnr...číslo příslušného pixelu

- Ukazatele pro indikaci celkové doby měření, počtu skenů, počtu chyb, průměrného času pro jeden sken, a doby, kdy byl poslední sken vykonán
- Graf zobrazující závislost napěťových úrovní na vlnové délce - Graf Counts
- Ukončení měření

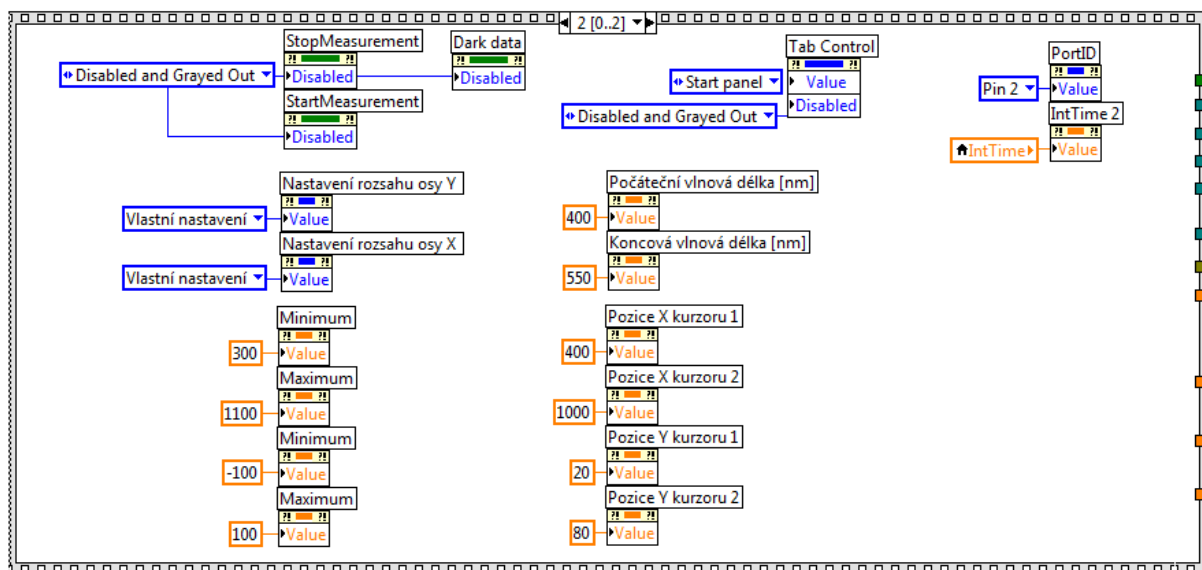
[38], [39]

V případě čelního panelu bylo potřeba hlavně upravit design, odebrat funkce určené pro laserová měření, jež by nebyla uskutečněna, přidat tlačítko *Ulož Dark* (jeho význam bude objasněn v kapitole 7.2.2 Kalibrace) a nadefinovat výchozí parametry pro měření.



Obrázek 14: Původní start panel

Inhned po inicializaci zařízení nastane načítání nadefinovaných výchozích parametru.



Obrázek 15: Nastavení výchozích parametrů

7.2.2 Kalibrace



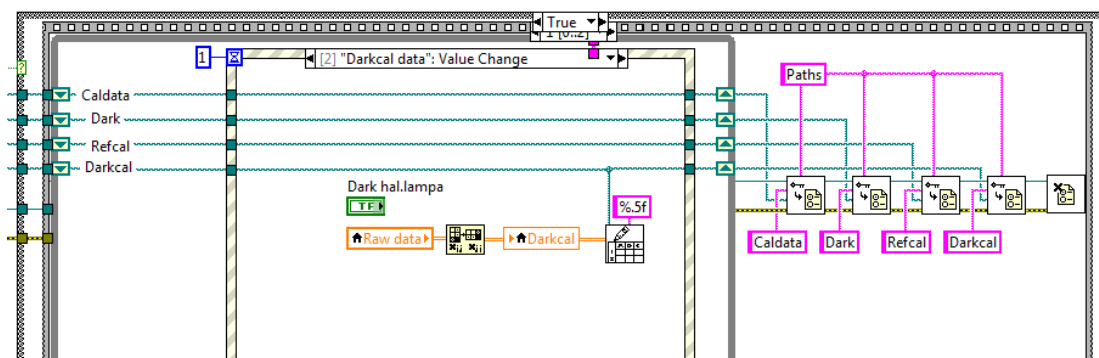
Obrázek 16: LabVIEW - Kalibrace

Před započítím každého měření by nejprve měla být provedena kalibrace. Ta spočívá v naměření tzv. *Dark dat*, čili intenzity okolního osvětlení tehdy, kdy je měřený zdroj vypnutý. Pokud by nebyla tato data naměřena, došlo by ke zkreslení výsledků, jelikož není nikdy možné zajistit, aby

Pokud není provedena kalibrace nová, musí být ovladač schopen zajistit načtení dat starších, naměřených a uložených v minulosti.

The screenshot shows a LabVIEW block diagram for a spectrophotometer. The diagram is titled "Vyberte zdroj lampy (Caldata)". It features a sequence of file operations: opening "data\AVS.ini", reading "Caldata.txt", "Dark", "Refcal", and "Darkcal" files, and then writing the data to a "Double" array. The files are located in "C:\Avantes_spektrofotometr\Data\". The output is a "Double" array with four elements: Dark, Refcal, Darkcal, and Caldata. The diagram is titled "Vyberte zdroj lampy (Caldata)".

33



Obrázek 18: Ukládání nových kalibračních dat a cest k nim

S kalibračními daty se následně dále operuje. Díky nim lze převést hodnoty napětových úrovní (Counts), náležící určitým vlnovým délkám, na intenzitu v $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, a to za využití následujícího vztahu:

$$I_n = \text{Caldata}_n \cdot \left(\frac{\text{sample}_n - \text{dark}_n}{\text{refcal}_n - \text{darkcal}_n} \right) \cdot \text{factor} \quad (10)$$

I_n ...intenzita záření [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] pro vlnovou délku n [nm]

Caldata_n ...intenzita záření [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$], příslušící vlnové délce n [nm], naměřená na normalizovaném zdroji - kalibrační lampě (soubor s těmito hodnotami je dodáván výrobcem lampy)

Sample_n ...napětová úroveň [Counts], příslušící vlnové délce n [nm], naměřená na zapnutém zdroji, který analyzujeme

Dark_n ...napětová úroveň [Counts], příslušící vlnové délce n [nm], naměřená na vypnutém zdroji, který analyzujeme

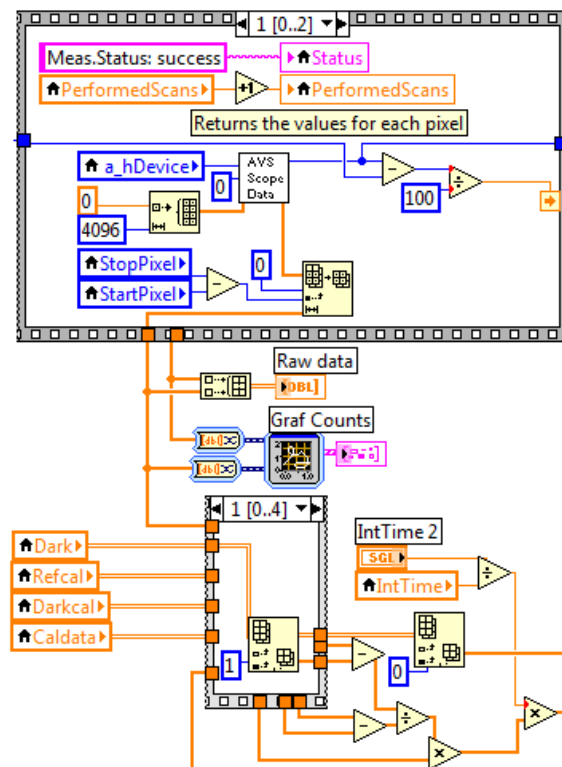
Refcal_n ...napětová úroveň [Counts], příslušící vlnové délce n [nm], naměřená na zapnuté kalibrační halogenové lampě

Darkcal_n ...napětová úroveň [Counts], příslušící vlnové délce n [nm], naměřená na vypnuté kalibrační halogenové lampě

Factor...poměr mezi integračním časem použitým při kalibraci [ms] a integračním časem použitým při měření [ms]

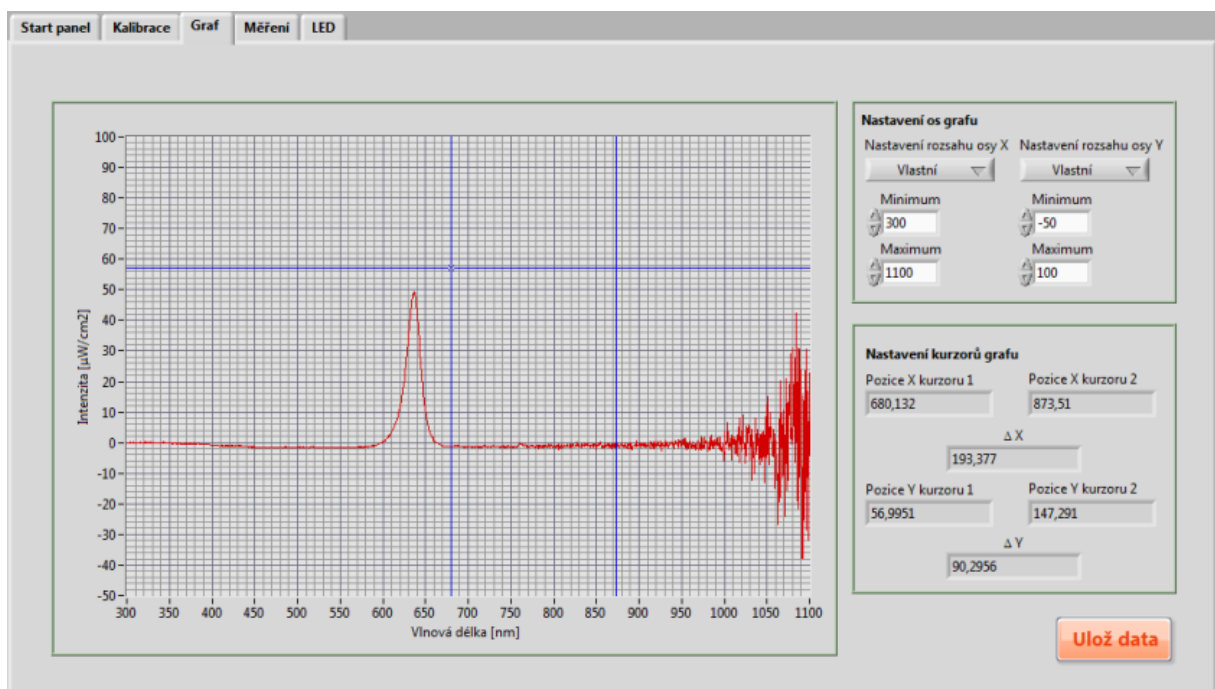
[22]

V LabVIEW byla data Sample byla získána prostřednictvím funkce *AVS_GetScopeData*, a hodnoty ostatních veličin vzorce z příslušných lokálních proměnných. Ve všech případech se pracovalo pouze s daty, jež představovaly intenzitu, případně napětové úrovně, tzn. že se z pole hodnot vyňal pouze druhý sloupec, a to funkcí *Index Array*. Následně byly provedeny matematické operace podle vzorce (10). Získaná výstupní data, spolu s příslušícími vlnovými délkami, jsou rovněž označována jako *a_data*, která jsou dále vykreslena v XY grafu a napojena na vstupy funkcí z knihovny IRRAD (více v kapitole 7.2.4 Měření).



Obrázek 19: Aplikace vzorce pro převod A/D Counts na intenzitu

7.2.3 Graf



Obrázek 20: LabVIEW - Graf

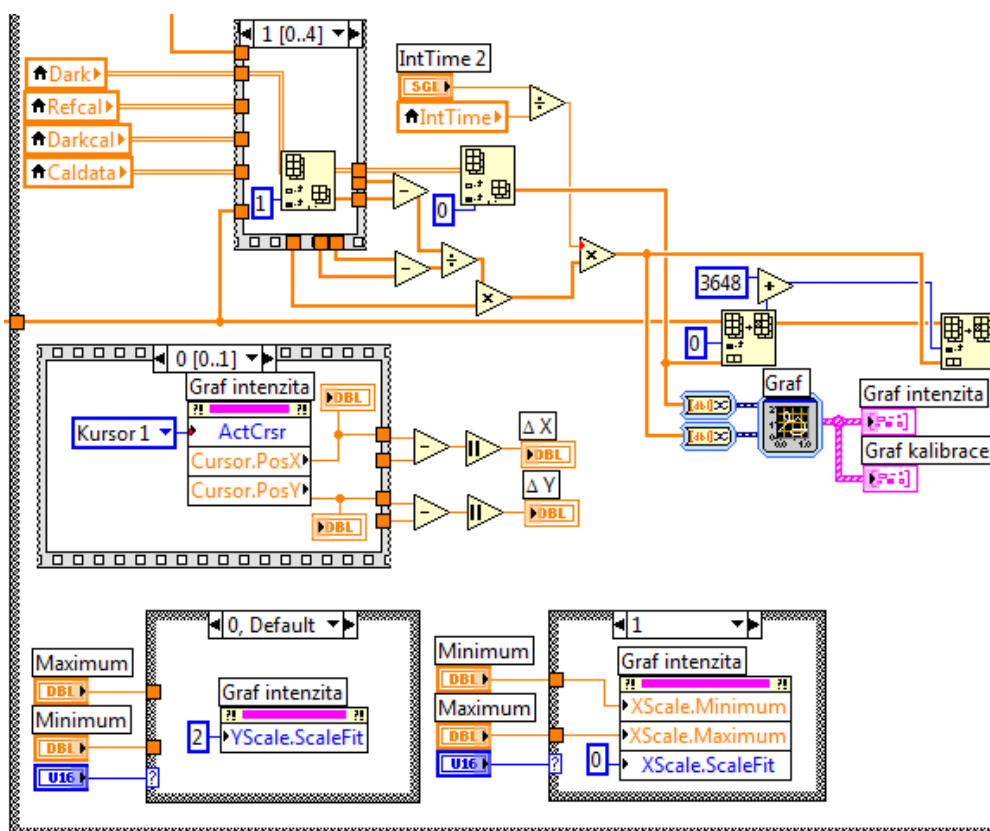
Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, závislost intenzity [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] na vlnové délce [nm] je průběžně vyobrazována XY grafem. Na vstup X byla napojena vlnová délka a na Y intenzita.

Aby bylo možné lokalizovat polohu určitých bodů na křivce nebo měřit vzdálenost mezi dvěma body, a to jak ve směru osy X, tak Y, byl graf opatřen kurzory. Tyto kurzory jsou křížové. Uživatel je průběžně informován o jejich pozici v obou směrech, a také o vzdálenosti ΔX a ΔY mezi nimi.

V LabVIEW je problematika kurzorů řešena tak, že v sekvenci dojde postupně k aktivaci jednotlivých ukazatelů (*Active Cursor*), a funkcí *Cursor Position* jsou zjištěny jejich polohy, jež jsou průběžně vypisovány na čelním panelu v příslušných indikátorech. Pak je funkcí *Subtract* vygenerován rozdíl mezi pozicemi X1 a X2. Obdobně je tomu i v případě osy Y. Z obou těchto rozdílů je nakonec vytvořena absolutní hodnota.

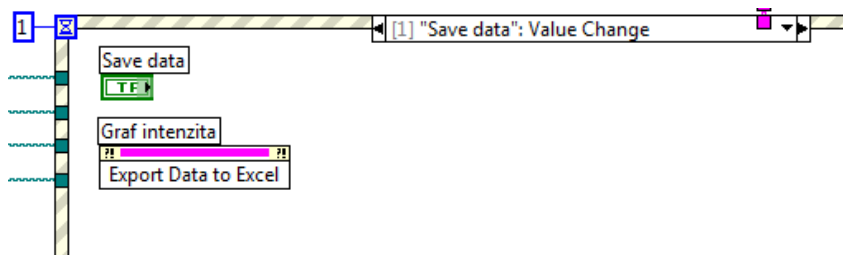
Dále bylo potřeba zajistit, aby mohl uživatel měnit nastavení rozsahu os grafu sám, případně aby byl k dispozici autoscale.

Řešení v LabVIEW je následující. Vzhledem k tomu, že je potřeba zajistit volbu rozsahu jak pro osu X, tak pro Y, byly použity dvě struktury *Case*. Každá z nich nabízí dvě možnosti nastavení os, a to autoscale a vlastní nastavení, mezi nimiž uživatel volí. Pro autoscale byla použita funkce *Scale Fit* se vstupem 2. V případě vlastního nastavení se funkce *Scale Fit* vstupem 0 deaktivuje a ovládacími prvky uživatel navolí požadovaný rozsah. Tento rozsah poslouží jako vstup pro *Range: Minimum a Range: Maximum*.



Obrázek 21: Vyobrazení grafu, nastavení jeho rozsahu a kurzorů

Posledním prvkem, který byl umístěn na panel Graf, je tlačítko pro uložení naměřených dat do MS Excel. Ve smyčce *Event* byla vytvořena událost *Save data*. Ta nastane v momentě, kdy uživatel stiskne tlačítko *Ulož data*. Po této signalizaci se aktivuje funkce *Export Data To Excel*, která zajistí přenesení aktuálně naměřených hodnot do souboru ve formátu *.xls.



Obrázek 22: Export dat do Excelu

7.2.4 Měření

Vstupní data		Radiometrie		
Počáteční vlnová délka [nm]	Koncová vlnová délka [nm]	Ozáření [μW/cm²]	Zářivost (intenzita záření) [μW/sr]	Fotony na m² [μMol/m²]
380	780	469,9	4,229E+5	0,3233
Integrační čas [ms]	Splinefactor	Energie na cm² [μJoule/cm²]	Vyzářená energie [μJoule/sr]	Fotony přijaté detektorem [μMol]
16	1	16	6767	3,862E-6
Plocha detektoru (kosinového korektoru) [cm²]		Zářivý tok [μW]	Fotonový tok na m² [μMol/(s·m²)]	
0,119459		56,14	20,21	
Vzdálenost mezi zdrojem a detektorem (kos. korektorem) [cm]		Energie přijatá detektorem [μJoule]	Fotonový tok [μMol/s]	
30		0,8982	0,0002414	

Kolorimetrie		Fotometrie		Měření peaku	
CIE rozlišení	CRI (Index podání barev)	Osvětlení detektoru [Lux]		Intenzita [μW/cm²]	Vlnová délka [nm]
Interval 1 nm	44,761	2498,35		Peak	8,192
Hodnota standardního pozorovatele	LED dominantní vlnová délka [nm]	Světelný tok přijatý detektorem [Lumen]		Centrální vlnová délka	7,9
2 stupně	582,461	0,0298451		Centroid	5,115
x	LED komplementární vlnová délka [nm]	Svitivost zdroje [Candela]		FWHM [nm]	19,76
0,380448	-1	224,852			
y	Sytost barvy [%]				
0,366446	24,1303				
Teplota chromatičnosti [K]					
3935,26					

Obrázek 23: LabVIEW - Měření

Hlavním úkolem ovládacího software je, aby byl schopen z naměřených dat, po zadání určitých vstupních parametrů, vypočítat hodnoty požadovaných kolorimetrických, radiometrických a fotometrických veličin a určit vlastnosti peaku (špičky).

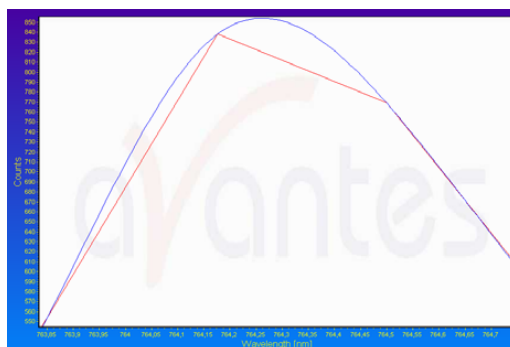
Při programování byla použita knihovna AVSIRRAD-DLL, která obsahovala všechny tyto funkce již předem naprogramované. Vstupem většiny z nich je pole hodnot, nazývané *a_data*. Toto pole je tvořeno dvěma sloupci, kdy první představuje vlnovou délku [nm] a druhý intenzitu [μW/cm²]. Některé z funkcí vyžadují ještě další vstupní parametry, a to rozsah (*počáteční a koncovou vlnovou délku* [nm] zájmové oblasti), *integrační čas* (ten je možné nastavovat na panelu Start, a pro měření je

pouze převzat z lokální proměnné IntTime), *faktor křivky* (viz. Kubická interpolace křivky), *plochu detektoru* (kosinového korektoru) a *vzdálenost mezi zdrojem a detektorem*.

Kubická interpolace křivky

Kubická interpolace slouží zaoblení průběhu křivky, definované pouze malým množstvím bodů. Na obrázku je znázorněn její vliv. Čtyři body pospojované rovnými čarami představují lineární interpolaci. V případě zakřivené linky byla aplikována kubická interpolace, a výsledkem jsou data spojitá v první i druhé derivaci. Faktor křivky (z angl. Splinefactor) stanovuje počet podbodů, které budou přidány mezi dva nadefinované body. Například, pokud máme ve směru osy X dány dva body, které jsou od sebe vzdáleny 100 nm, a zadáme faktor 20, sníží se interval mezi jednotlivými prvky na 5 nm.

[22]



Obrázek 24: Kubická interpolace křivky [22]

7.2.4.1 Kolorimetrie

Viditelné záření, vysílané světelnými zdroji, má schopnost vyvolat barevný vjem. Konkrétní barva světla je závislá na jeho spektrálním složení. Světla s nejkratšími vlnovými délkami vyvolávají vjem barvy fialové, s nejdelšími červené.

[27], [28]

Tabulka 3: Rozsahy vlnových délek spektrálních světél [27]

Spektrální rozsah λ [nm]	Barva světla
380 - 450	Fialová
450 - 480	Tmavě modrá
480 - 500	Světle modrá
500 - 560	Zelená
560 - 590	Žlutá
590 - 620	Oranžová
620 - 780	Červená

Barvy lze rozdělit na základní (modrá, zelená, červená) a doplňkové (žlutá, purpurová, modrozelená).

[27]



Obrázek 25: Základní a doplňkové barvy

Vhodným namícháním základních barev (RGB) můžeme získat libovolný odstín. Spojením veškerých spektrálních světél získáme světlo barvy bílé. [27]

Kolorimetrie je metoda, díky které můžeme charakterizovat jakoukoliv barvu trichromatickými souřadnicemi x , y , z . Ty lze vypočítat na základě **trichromatických složek** X , Y , Z , pro něž platí:

$$X = k \cdot \sum I_{\lambda} \cdot x_{\lambda} \quad (11)$$

$$Y = k \cdot \sum I_{\lambda} \cdot y_{\lambda} \quad (12)$$

$$Z = k \cdot \sum I_{\lambda} \cdot z_{\lambda} \quad (13)$$

$$k = \frac{1}{\sum y_{\lambda}} \quad (14)$$

k ...normalizační faktor

I_{λ} ...spektrální ozáření pro vlnovou délku λ

x_{λ} , y_{λ} , z_{λ} ...hodnoty standardního pozorovatele CIE 1931 nebo 1964 (2° nebo 10°)

Pozn.: V závislosti na úhlu vstupu paprsků do lidského oka se rozlišují dva typy pozorovatelů. Roku 1931 byl CIE (Mezinárodní komise pro osvětlování) definován 2° standardní pozorovatel, který se používá ve většině případů. Roku 1964 byl definován ještě 10° pozorovatel, který je vhodnější pro hodnocení barevnosti větších ploch.

[22], [29]

Trichromatické souřadnice pak stanovujeme za použití těchto vztahů:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (15)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (16)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (17)$$

Hodnota z se obvykle neuvádí, neboť platí, že $x + y + z = 1$.

[28]

Při výpočtu x a y v LabVIEW je vhodné nastavit CIE rozlišení na 1 nm. [22]

Teplota chromatičnosti je teplota absolutně černého tělesa tehdy, kdy je schopno vyvolat stejný barevný vjem, jako srovnávaný zdroj. Jednotkou je Kelvin. Funkce knihovny IRRAD využívá pro výpočet následující vztahy:

$$p = \frac{x - 0,332}{y - 0,1858} \quad (18)$$

$$\text{Color Temperature} = 5520,33 - 6823,3p + 3525p^2 - 449p^3 \quad (19)$$

[22], [30]

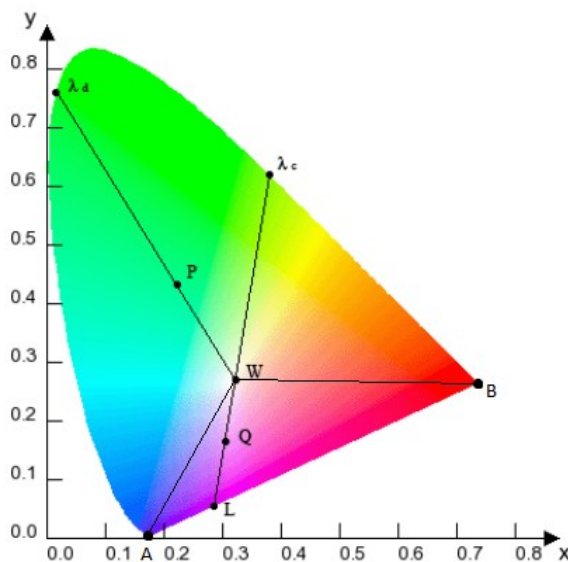
Index podání barev (CRI - Color Rendering Index) je hodnotou udávající věrnost podání barev. Nabývá hodnot 0 až 100, a platí, že čím je číslo vyšší, tím je zdroj kvalitnější. Při hodnotě CRI = 100 bude lidské oko schopno vnímat barvy stejně, jako za denního světla. Při výpočtu CRI v LabVIEW je jedním vstupem CIE rozlišení, jež by mělo být nastaveno na 5 nm. [31]

Pokud je měření prováděno za účelem určení vlastností LED, často se pro popis barev využívají veličiny zvané **dominantní vlnová délka**, **komplementární (doplňková) vlnová délka** a **sytylost barvy**.

Dominantní vlnovou délkou lze popsat polychromatickou barvu - je to totiž vlnová délka, odpovídající odstínu, který ve směsi převládá. Ne u všech barev je ale možné ji určit. Pokud se vlnová délka směsi vyskytuje v intervalu od 700 do 780 nm (odstíny fialové), stanovuje se pouze komplementární vlnová délka (její význam je ovšem podobný).

Sytost barvy vypovídá o saturaci daného odstínu. Udává, z kolika procent je v něm obsažena barva, náležící dominantní vlnové délce.

Všechny tyto veličiny jsou určovány na základě diagramu chromatičnosti.



Obrázek 26: Diagram chromatičnosti [32]

Dominantní vlnová délka λ_d se určuje tak, že se úsečkou spojí barevný bod P (daný souřadnicemi x , y) a standardní bílý bod W. Tato úsečka se následně prodlouží, a v místě, kde se protne se obalovou křivkou diagramu, se nalézá λ_d .

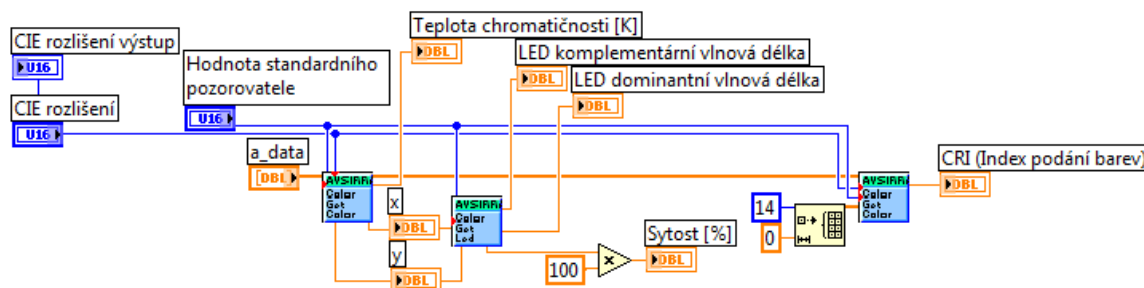
Komplementární vlnová délka λ_c se určuje pro odstíny, které na diagramu leží v trojúhelníkové oblasti WBA. V tomto případě jde o bod Q. λ_c se určuje tím způsobem, že se přímkou spojí body W a Q. Linie purpurové je na obrázku protnuta v bodě L, a přímo proti němu, v místě, kde se nachází průsečík přímky a obalové křivky diagramu, se vyskytuje λ_c .

Sytost barvy je dána poměrem úseček W - P a W - λ_d . Tento poměr je následně vynásoben 100, protože se výsledek uvádí v procentech.

[22], [32], [33], [34]

7.2.4.1.1 Kolorimetrické funkce knihovny IRRAD

Při programování byly využity všechny níže uvedené funkce, které byly následně vloženy do SubVI s názvem Kolorimetrie.



Obrázek 27: SubVI - Kolorimetrie

Color_GetColorOfLightParam

Funkce počítá parametry barev.

Mezi vstupy patří a_data , CIE rozlišení a hodnota standardního pozorovatele.

Výstupy jsou x , y , z , X , Y , Z , u , v a teplota chromatičnosti.

Color_GetLedParamFromxy

Funkce počítá specifické parametry LED ze souřadnic x a y .

Mezi vstupy patří x , y a hodnota standardního pozorovatele.

Výstupy jsou LED dominantní a LED komplementární vlnová délka, a sytost barvy.

Pokud se vlnová délka záření nachází v intervalu od 380 do 699 nm, bude vypočítána pouze dominantní vlnová délka, a na místě komplementární vlnové délky se objeví -1. Naopak, pokud záření spadá do intervalu 700 až 780 nm, bude vypočtena komplementární vlnová délka, a na místě dominantní vlnové délky bude indikována -1.

Color_GetColorRenderingIndex

Funkce počítá parametry barev.

Vstupy tvoří *a_data*, *CIE rozlišení* a *hodnota standardního pozorovatele*.

Výstupy jsou *R_hodnoty* a *CRI* (Index podání barev).

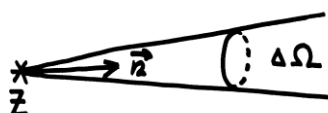
[22]

7.2.4.2 Radiometrie

Radiometrické veličiny charakterizují výkon zdroje, resp. udávají množství energie, jež je přenesena na ozařovaná tělesa. Mohou být rozděleny do tří skupin:

- Zářivý tok [μW]: Je to celkový optický výkon vyzářený bodovým zdrojem do všech směrů.
- Zářivost [$\mu\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$], neboli intenzita záření: Je to zářivý tok $\Delta\Phi_e$ vyzářený bodovým zdrojem Z do malého prostorového úhlu $\Delta\Omega$ ve směru zadaném jednotkovým vektorem \vec{n} .

$$I_e(\vec{n}) = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta\Omega} \quad (20)$$



Obrázek 28: Grafické vyobrazení zářivosti a prostorového úhlu [10]

- Ozáření [$\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$]: Je to zářivý tok dopadající na jednotku povrchu (plochu) ozařovaného tělesa.

$$E_e = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta S} \quad (21)$$

[10], [22]

Distribuívaný výkon může být snadno převeden na distribuovanou energii, a to vynásobením výkonu integračním časem. Výsledkem je množství energie, která byla vyzářena nebo přijata během jedné integrační doby. Takto získáme hodnotu energie připadající na cm^2 [$\mu\text{Joule}/\text{cm}^2$], energie přijaté povrchem kosinového korektoru [μJoule] a celkové energie vyzářené zdrojem [$\mu\text{Joule}/\text{sr}$].

Mezi radiometrické veličiny patří také vyjádření počtu fotonů, které jsou přijaty povrchem kosinového korektoru během jedné integrační doby [μMol], fotonů připadajících na m^2 během jedné integrační doby [$\mu\text{Mol}/\text{m}^2$], fotonů přijatých za sekundu povrchem kosinového korektoru [$\mu\text{Mol}/\text{s}$] a fotonů přijatých za sekundu na metru čtverečním [$\mu\text{Mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$]. Vzorový výpočet je uveden níže.

[22]

Energie fotonů:

$$E(\lambda) = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (22)$$

h...Planckova konstanta ($h = 6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

c...rychlost světla ($c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

λ ...vlnová délka v metrech

Výpočet energie fotonů pro např. 250 nm:

$$E(250) = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{250 \cdot 10^{-9}} = 7,946 \cdot 10^{-19} \text{ Joule/foton} \quad (23)$$

1 eV = $1,60207 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, takže energie fotonů vyjádřena v eV/foton je:

$$E(250) = \frac{7,946 \cdot 10^{-19}}{1,60207 \cdot 10^{-19}} = 4,9592 \text{ eV/foton} \quad (24)$$

Pokud pro vlnovou délku 250 nm naměříme ozáření $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, platí:

$$E_e = 20 \mu\text{W}/\text{cm}^2 = 20 \mu\text{Joule}/\text{s}/\text{cm}^2 = 0,2 \mu\text{Joule}/\text{s}/\text{m}^2 \quad (25)$$

$$E_e = 0,2 \mu\text{Joule}/\text{s}/\text{m}^2 = 0,2/(1,60207 \cdot 10^{-19}) \text{ eV}/\text{s}/\text{m}^2 = 1,248 \cdot 10^{18} \text{ eV}/\text{s}/\text{m}^2 \quad (26)$$

Nyní již můžeme vypočítat počet fotonů/s/m²:

$$\frac{E_e}{E(250)} = \frac{1,248 \cdot 10^{18}}{4,9592} = 2,517 \cdot 10^{17} \frac{\text{Fotonů}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (27)$$

Přepočet na μmoly:

$$1 \text{ mol} = 6,02308 \cdot 10^{23} \text{ (Avogadrova konstanta)}$$

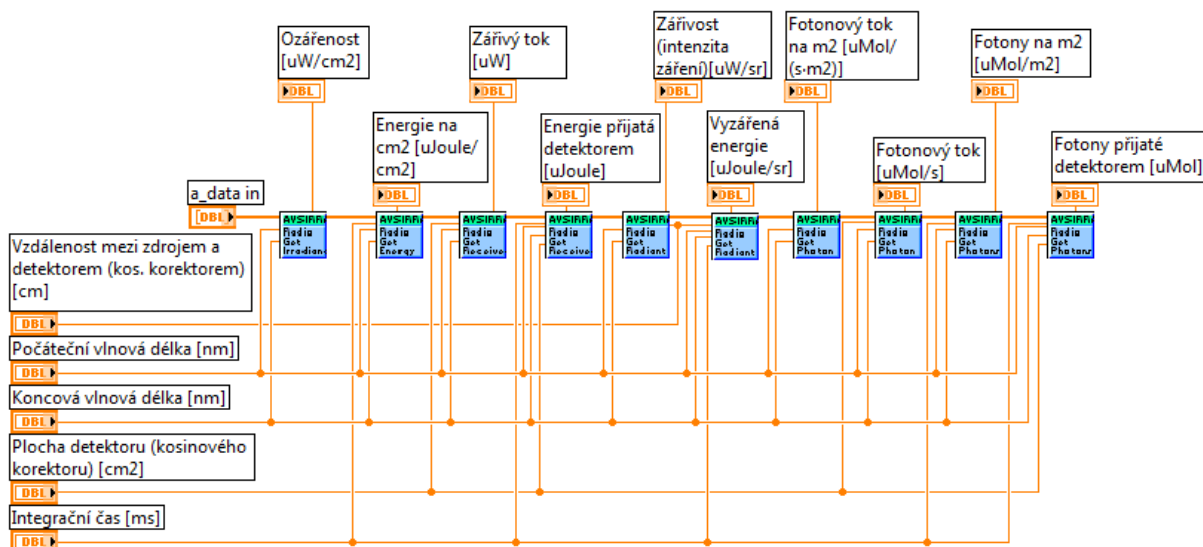
$$1 \mu\text{mol} = 6,02308 \cdot 10^{17}$$

$$\frac{2,517 \cdot 10^{17}}{6,02308 \cdot 10^{17}} = 0,418 \frac{\mu\text{mol}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (28)$$

[22]

7.2.4.2.1 Radiometrické funkce knihovny IRRAD

Při programování byly využity níže uvedené funkce, které byly následně vloženy do SubVI s názvem Radiometrie.



Obrázek 29: SubVI - Radiometrie

Radio_GetIrradiance

Funkce počítá *ozáření* [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$], a to zintegrováním vstupních dat v daném rozsahu.

Mezi vstupy patří *a_data*, *počáteční vlnová délka* a *koncová vlnová délka*.

Radio_GetEnergyPerCM2

Funkce počítá *energii přijatou na cm^2* [$\mu\text{Joule}/\text{cm}^2$], a to zintegrováním vstupních dat v daném rozsahu a následným vynásobením výsledné hodnoty integračním časem.

Vstupy tvoří *a_data*, *počáteční vlnová délka*, *koncová vlnová délka* a *integrační čas*.

Radio_GetReceivedPower

Funkce počítá *zářivý tok* [μW], což je výkon přijatý povrchem detektoru, a to zintegrováním vstupních dat v daném rozsahu a následným vynásobením výsledné hodnoty plochou detektoru.

Mezi vstupy patří *a_data*, *počáteční vlnová délka*, *koncová vlnová délka* a *plocha detektoru* (kosinového korektoru).

Radio_GetReceivedEnergy

Funkce počítá *energii přijatou povrchem detektoru* [μJoule], a to zintegrováním vstupních dat v daném rozsahu a následným vynásobením výsledné hodnoty plochou detektoru a integračním časem.

Vstupními daty jsou *a_data*, *počáteční vlnová délka*, *koncová vlnová délka*, *integrační čas*, *plocha detektoru* (kosinového korektoru).

Radio_GetRadiantIntensity

Funkce počítá *zářivost* (intenzitu záření) [$\mu\text{W}/\text{sr}$], a to vynásobením vstupních dat druhou mocninou vzdálenosti od zdroje.

Mezi vstupy patří *a_data*, *počáteční vlnová délka*, *koncová vlnová délka*, *vzdálenost mezi zdrojem a detektorem*.

Radio_GetRadiantEnergy

Funkce počítá *vyzářenou energii* [$\mu\text{Joule}/\text{sr}$], a to vynásobením vstupních dat druhou mocninou vzdálenosti od zdroje a integračním časem.

Vstupy tvoří *a_data*, *počáteční vlnová délka*, *koncová vlnová délka*, *integrační čas*, *vzdálenost mezi zdrojem a detektorem*.

Radio_GetPhotonFluxPerM2

Funkce stanovuje *fotonový tok přijatý na metru čtverečním* [$\mu\text{Mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$], a to převodem z $\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{nm})$.

Vstupními daty jsou *a_data*, *počáteční vlnová délka*, *koncová vlnová délka*.

Radio_GetPhotonFlux

Funkce počítá *fotonový tok přijatý povrchem detektoru* [$\mu\text{Mol}/\text{s}$], a to vynásobením fotonového toku (přijatého na metru čtverečním) povrchem detektoru.

Mezi vstupy patří *a_data*, *počáteční vlnová délka*, *koncová vlnová délka*, *plocha detektoru (kosinového korektoru)*.

Radio_GetPhotonsPerM2

Funkce počítá *fotony dopadající na metr čtvereční* [$\mu\text{Mol}/\text{m}^2$], a to vynásobením fotonového toku (přijatého na metru čtverečním) integračním časem.

Vstupy jsou *a_data*, *počáteční vlnová délka*, *koncová vlnová délka*, *integrační čas*.

Radio_GetPhotons

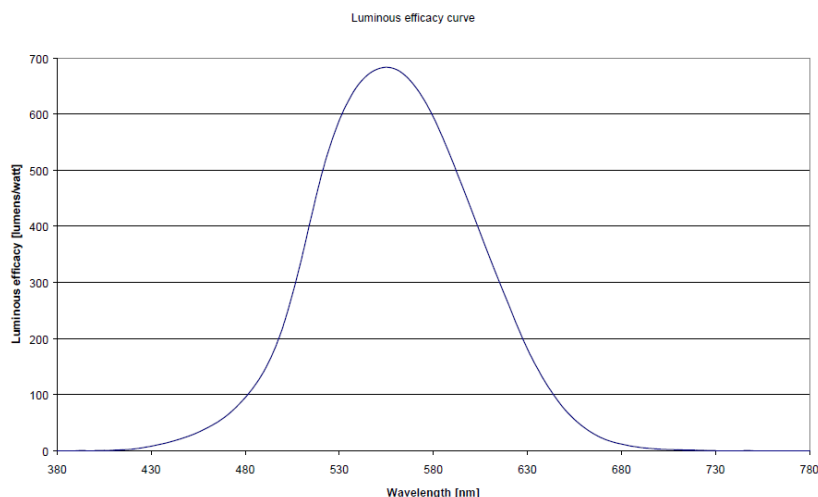
Funkce počítá *fotony dopadající na povrch detektoru (kosinového korektoru)* [μMol], a to vynásobením fotonového toku (přijatého na metru čtverečním) povrchem detektoru a integračním časem.

Vstupy tvoří *a_data*, *počáteční vlnová délka*, *koncová vlnová délka*, *integrační čas* a *plocha detektoru (kosinového korektoru)*.

[22]

7.2.4.3 Fotometrie

Fotometrie je disciplína, zabývající se měřením viditelného světla, ale na rozdíl od radiometrie se nejedná pouze o fyzikální měření, kdežto je zde zohledněna i citlivost lidského oka na různé vlnové délky. Fotometrické veličiny jsou analogické k radiometrickým. Ekvivalentem k zářivému toku [μW] je světelný tok [Lumen], k zářivosti [$\mu\text{W}/\text{sr}$] svítivost [Lumen/sr = Candela] a k ozáření [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$] osvětlení [Lumen/ m^2 = Lux]. [22]

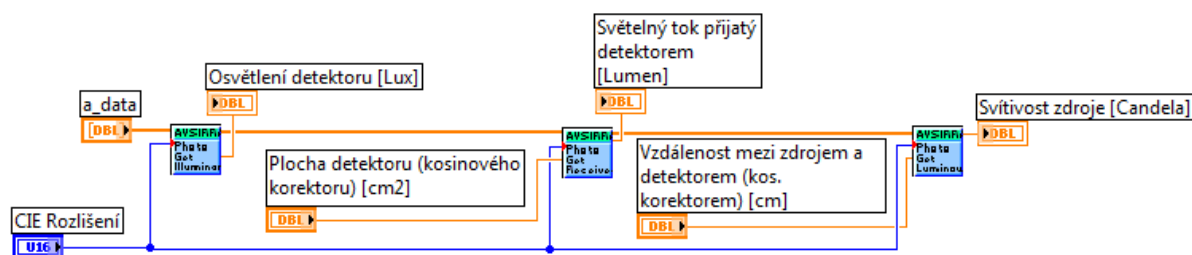


Obrázek 30: Křivka světelné účinnosti [22]

V LabVIEW se fotometrické veličiny stanovují vynásobením radiometrických dat křivkou světelné účinnosti (Obrázek 30), a následnou integrací v rozsahu od 380 do 780 nm. [22]

7.2.4.3.1 Fotometrické funkce knihovny IRRAD

Při programování byly využity níže uvedené funkce, které byly poté opět vloženy do SubVI s názvem Fotometrie.



Obrázek 31: SubVI - Fotometrie

Photo_GetIlluminance

Funkce počítá osvětlení [Lux].

Mezi vstupy patří *a_data* a *CIE rozlišení*.

Photo_GetReceivedLuminousFlux

Funkce počítá *světelný tok* [Lumen].

Vstupy jsou *a_data*, *CIE rozlišení* a *plocha detektoru* (kosinového korektoru).

Photo_GetLuminousIntensity

Funkce počítá *svítivost* [Candela].

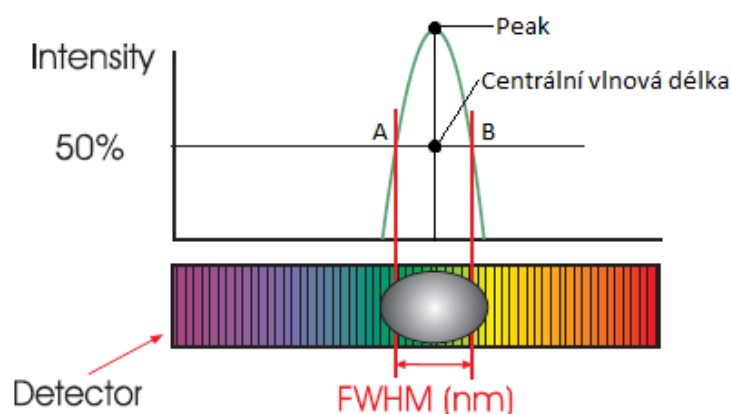
Vstupními daty jsou *a_data*, *CIE rozlišení* a *vzdálenost mezi zdrojem a detektorem*.

[22]

7.2.4.4 Měření špičky (peaku)

Při **měření špičky** (peaku) se stanovuje jeho vlnová délka a intenzita. Dále je určována **šířka pásma** (FWHM, z angl. Full Width Half Maximum), což je šířka špičky tehdy, kdy je intenzita rovna 50 % ze svého maxima, a **centrální vlnová délka**, čili vlnová délka, která se nachází ve středu šířky pásma (mezi body A a B). Centrální vlnová délka se rovná vlnové délce špičky, je-li naměřená křivka symetrická. Poslední veličinou, jež se ze spektrální charakteristiky určuje, je **centroid**, tedy těžiště plochy pod křivkou.

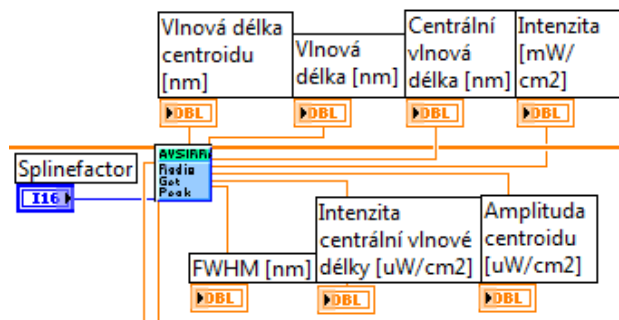
[22]



Obrázek 32: FWHM, peak, centrální vlnová délka [23]

7.2.4.4.1 Funkce knihovny IRRAD pro měření peaku

Při programování byla využita funkce *GetPeak*.



Obrázek 33: Funkce GetPeak

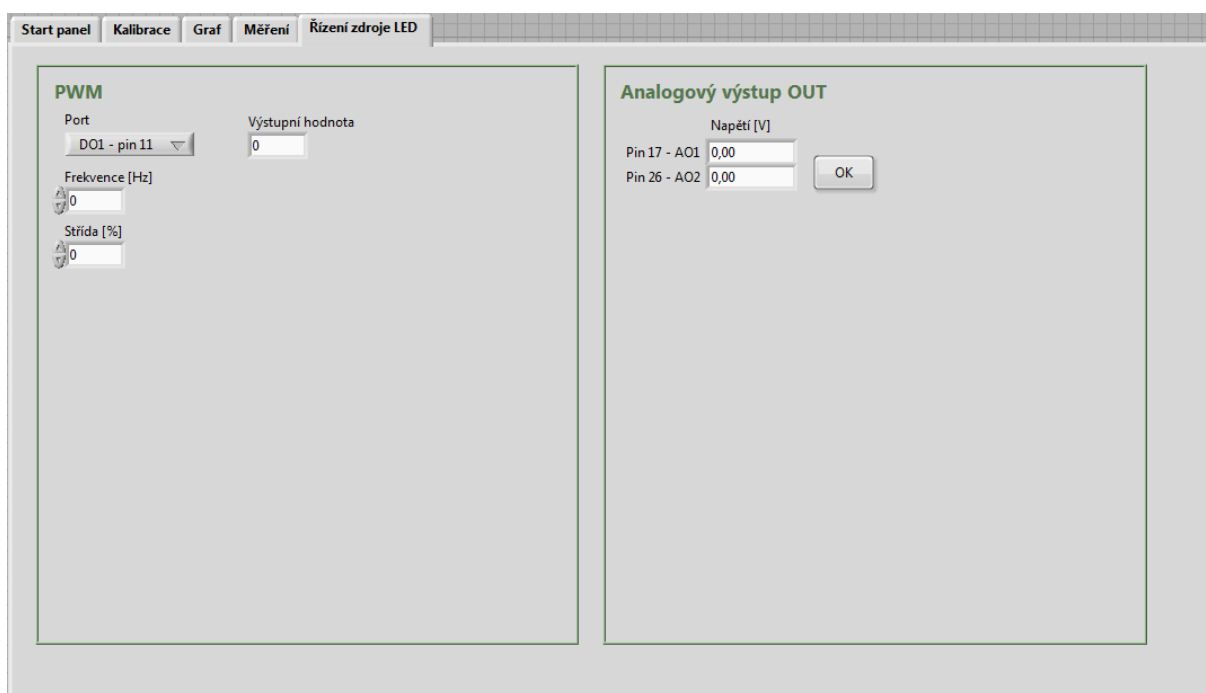
Radio_GetPeak

Funkce stanovuje charakteristiky peaku.

Vstupy tvoří *a_data*, počáteční vlnová délka, koncová vlnová délka a *splinefactor*.

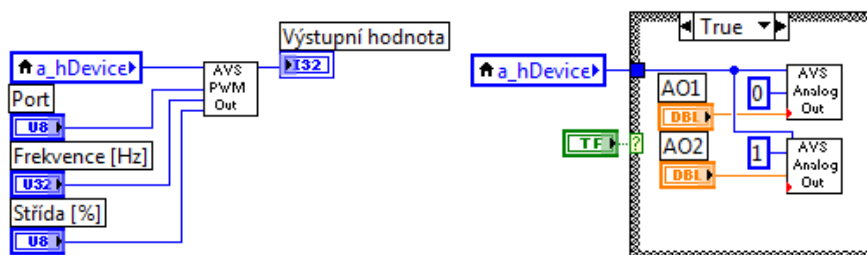
Výstupy jsou vlnová délka peaku [nm], intenzita peaku [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$], *FWHM* [nm], centrální vlnová délka [nm], intenzita centrální vlnové délky [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$], vlnová délka centroidu [nm] a amplituda centroidu [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]. [22]

7.2.5 Řízení zdroje LED



Obrázek 34: LabVIEW - Řízení zdroje LED

Při programování ovladače PWM a analogového výstupu byly použity funkce knihovny AS-5216-DLL.



Obrázek 35: Nalevo - funkce AVS PWM out, napravo - funkce AVS Analog Out

AVS_SetPwmOut

Funkce ovládá PWM výstup. K dispozici je šest pinů - 11, 2, 30, 3, 21 a 13. Rozsah frekvencí je od 500 Hz do 300 kHz, a střída od 0 do 100 %.

Mezi vstupy patří zařízení (*a_hDevice*), číslo pinu (*port*), *frekvence* [Hz] a *střída* [%].

Výstupem je signalizace chyby. V případě, že je vše v pořádku, na výstupu bude 0, a pokud nastane chyba, objeví se -1. [39]

AVS_SetAnalogOut

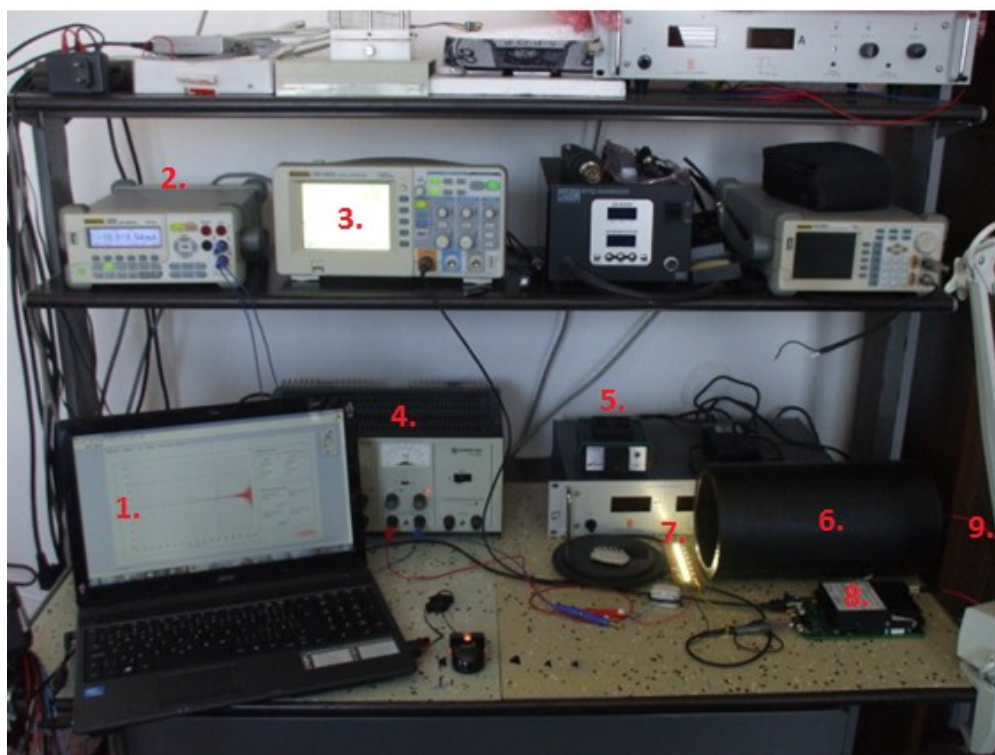
Funkce slouží k nastavování stejnosměrného analogového výstupního napětí pro příslušný pin. K dispozici jsou dva piny - 17 a 26. Rozsah napětí je od 0 do 5 V.

Vstupy tvoří zařízení (*a_hDevice*), číslo pinu (*a_PortId*) a hodnota napětí (*AO1*, *AO2*) [V]. [39]

8 Experimentální měření - realizace a testování měřicí sestavy a software

Cílem experimentu bylo otestování funkčnosti zrealizovaného měřicího pracoviště a vyvinutého softwaru. Byly při něm naměřeny spektrální charakteristiky a hodnoty radiometrických, fotometrických a kolorimetrických veličin pro tři druhy LED. Dále byla odzkoušena funkčnost ovládání PWM a analogových výstupů za použití digitálního multimetru a digitálního osciloskopu.

Měřicí pracoviště pro spektrofotometrii bylo zapojeno podle obrázku 11 (kapitola 6.2 Měřicí pracoviště), přičemž byl zdroj záření umístěn do tubusu. Do budoucna se počítá i s realizací měřicího pracoviště s řízeným napájecím zdrojem LED (Obrázek 12, kapitola 6.2 Měřicí pracoviště). V rámci této práce bylo ale prozatím zajištěno pouze softwarové ovládání požadovaných výstupů spektrofotometru.



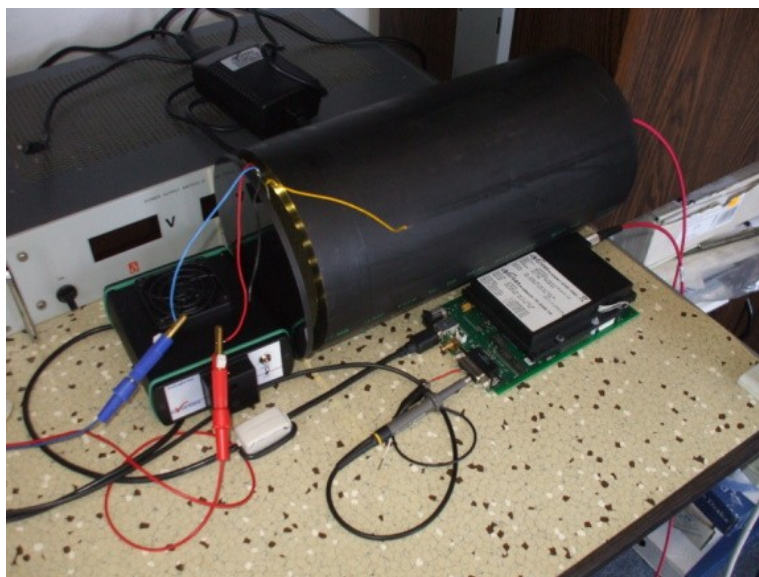
Obrázek 36: Měřicí sestava

Použité vybavení podle Obrázek 36:

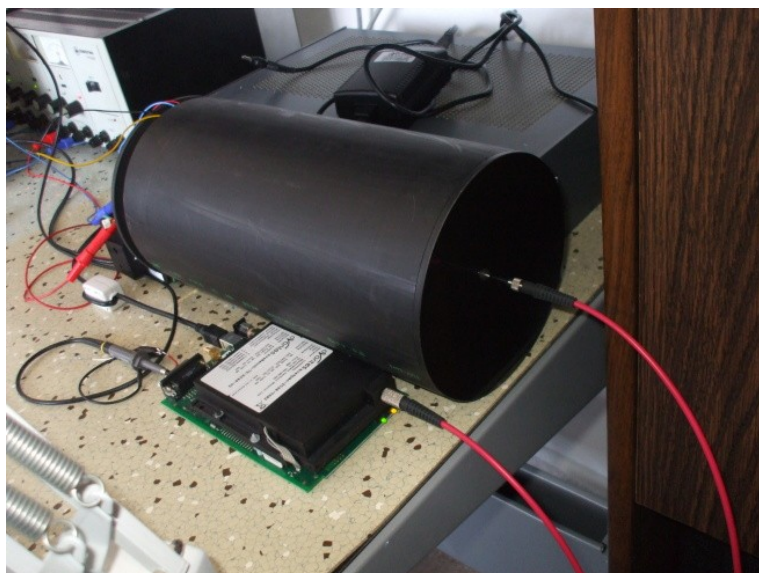
1. PC s ovládacím softwarem spektrofotometru Avantes, vyvinutým v LabVIEW
2. Digitální multimetr Rigol DM 3051
3. Digitální osciloskop Rigol DS 1102E
4. Stabilizovaný zdroj napětí a proudu Statron 3225
5. Kalibrační halogenová lampa Avantes AvaLight HAL-CAL
6. Měřicí tubus délky 300 mm

7. Měřený zdroj - LED firmy Avago Technologies (Příloha I)
 - Červená LED - ASMT - JR10 - ARS01
 - Modrá LED - ASMT - JB11 - NMP01
 - Bílá LED - ASMT - JN11 - NTU01
8. Spektrofotometr Avantes AvaSpec - 2048
9. Nízkoabsorpční křemičité optické vlákno s kosinovým korektorem

8.1 Výsledky spektrofotometrických měření



Obrázek 37: Detail měřicí sestavy - pohled zepředu. Napájený měřený zdroj je vložen do tubusu a přiklopen víkem.



Obrázek 38: Detail měřicí sestavy - pohled zezadu. Kosinový korektor je zasunutý do tubusu.

Start panel | Kalibrace | Graf | Měření | LED

Vstupní data

Počáteční vlnová délka [nm] 380 Koncová vlnová délka [nm] 780

Integrační čas [ms] 16 Splinefactor 1

Plocha detektoru (kosinového korektoru) [cm²] 0,119459

Vzdálenost mezi zdrojem a detektorem (kos. korektorem) [cm] 30

Radiometrie

Ozáření [μW/cm²] 173,6 Zářivost (intenzita záření) [μW/sr] 1,562E+5 Fotony na m² [μMol/m²] 0,02008

Energie na cm² [μJoule/cm²] 16 Vyzářená energie [μJoule/sr] 2500 Fotony přijaté detektorem [μMol] 2,399E-7

Zářivý tok [μW] 20,74 Fotonový tok na m² [μMol/(s·m²)] 1,255

Energie přijatá detektorem [μJoule] 0,3318 Fotonový tok [μMol/s] 1,499E-5

Kolorimetrie

CIE rozlišení Interval 1 nm CRI (Index podání barev) 0

Hodnota standardního pozorovatele 2 stupně LED dominantní vlnová délka [nm] 573,969

x 0,002741 y -0,130081 LED komplementární vlnová délka [nm] -1

Teplota chromatičnosti [K] 1729,46 Sytost barvy [%] 238,955

Fotometrie

Osvětlení detektoru [Lux] -662,432

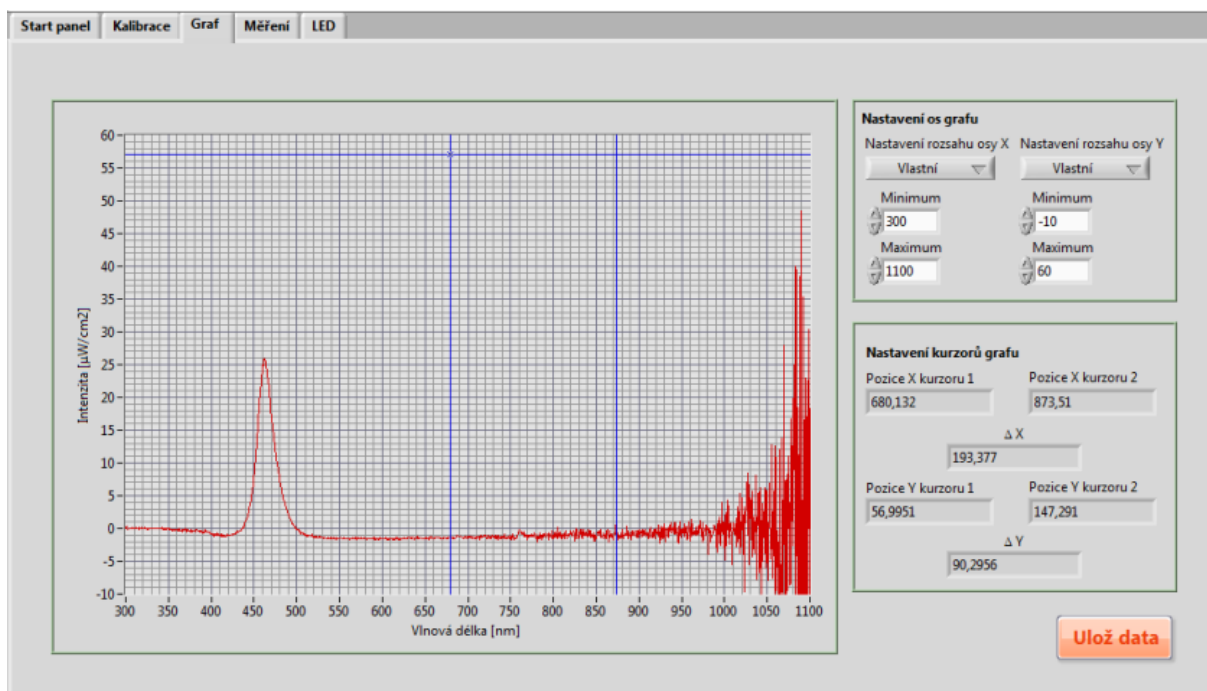
Světelný tok přijatý detektorem [Lumen] ,007913

Svitivost zdroje [Candela] -59,6189

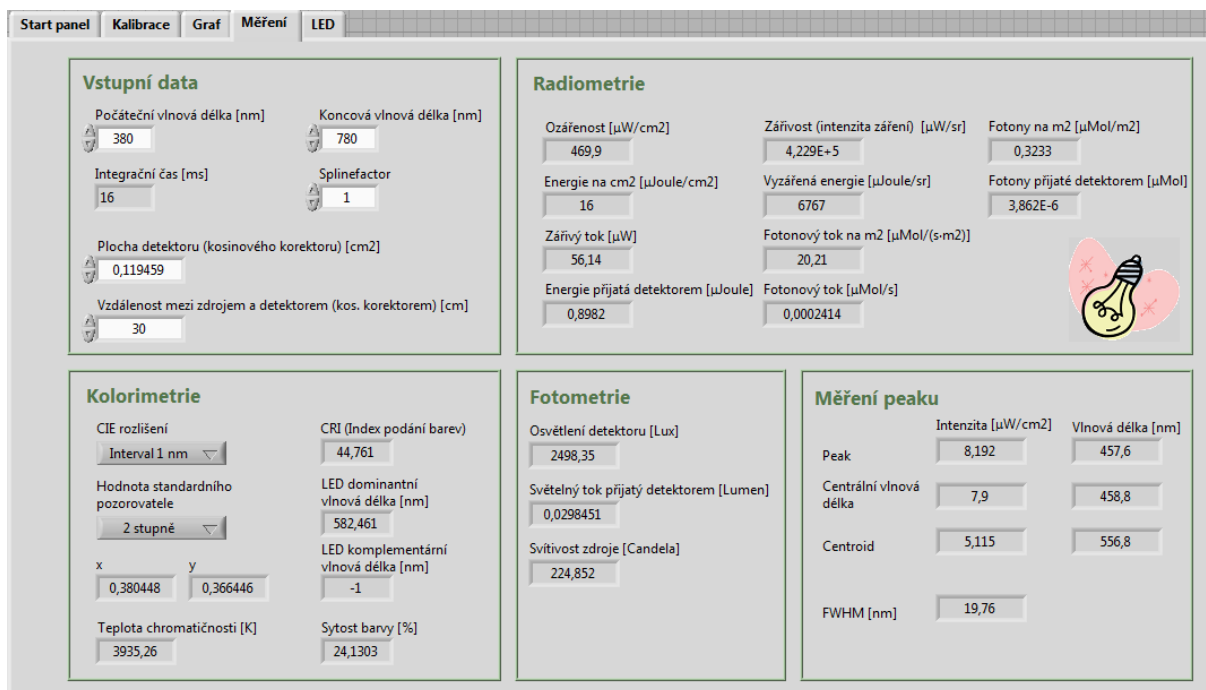
Měření peaku

	Intenzita [μW/cm ²]	Vlnová délka [nm]
Peak	25,97	463,4
Centrální vlnová délka	25,83	463,6
Centroid	19,94	456,8
FWHM [nm]	20,82	

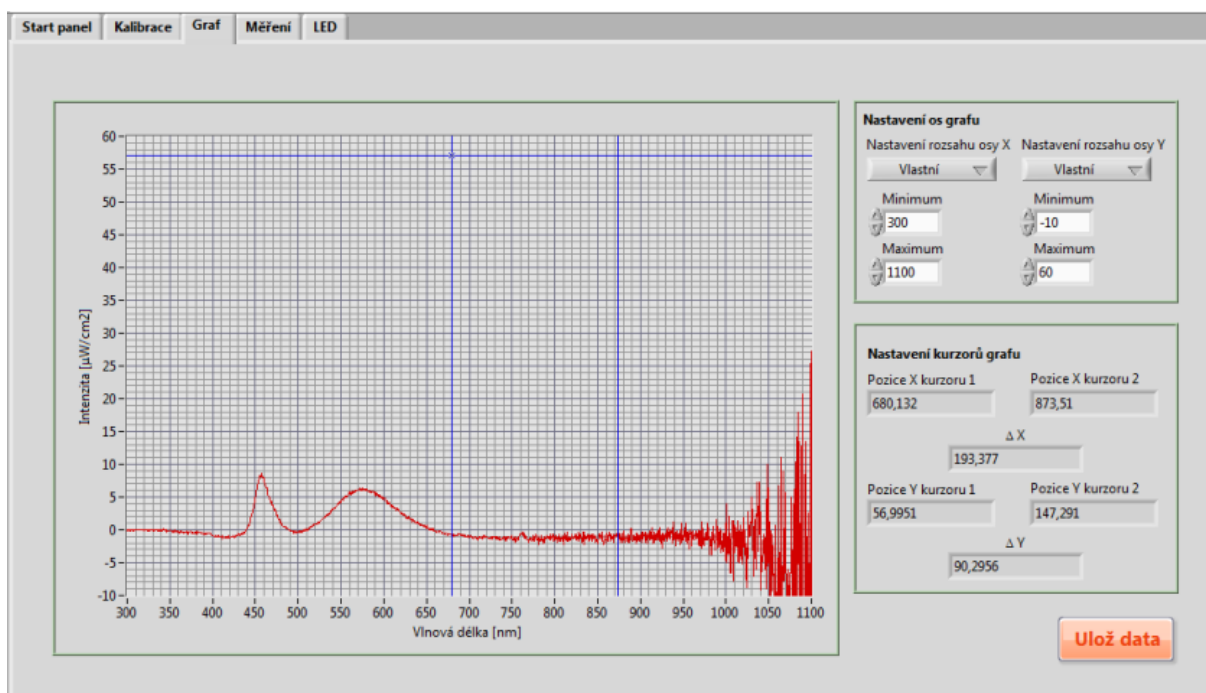
Obrázek 39: Naměřená data pro modrou LED - řetězec složený ze šesti modrých diod, napájecí proud $I_{LED} = 75 \text{ mA}$



Obrázek 40: Spektrální charakteristika modré LED - řetězec složený ze šesti modrých diod, napájecí proud $I_{LED} = 75 \text{ mA}$



Obrázek 41: Naměřená data pro bílou LED - řetězec složený ze sedmi bílých diod, napájecí proud $I_{LED} = 97 \text{ mA}$



Obrázek 42: Spektrální charakteristika bílé LED - řetězec složený ze sedmi bílých diod, napájecí proud $I_{LED} = 97 \text{ mA}$

Start panel | Kalibrace | Graf | Měření | LED

Vstupní data

Počáteční vlnová délka [nm] Koncová vlnová délka [nm]

Integrační čas [ms] Splinefactor

Plocha detektoru (kosinového korektoru) [cm²]

Vzdálenost mezi zdrojem a detektorem (kos. korektorem) [cm]


Radiometrie

Ozáření [μW/cm²] Zářivost (intenzita záření) [μW/sr] Fotony na m² [μMol/m²]

Energie na cm² [μJoule/cm²] Vyzářená energie [μJoule/sr] Fotony přijaté detektorem [μMol]

Zářivý tok [μW] Fotonový tok na m² [μMol/(s·m²)]

Energie přijatá detektorem [μJoule] Fotonový tok [μMol/s]



Kolorimetrie

CIE rozlišení CRI (Index podání barev)

Hodnota standardního pozorovatele LED dominantní vlnová délka [nm]

x y LED komplementární vlnová délka [nm]

Teplota chromatičnosti [K] Sytost barvy [%]

Fotometrie

Osvětlení detektoru [Lux]

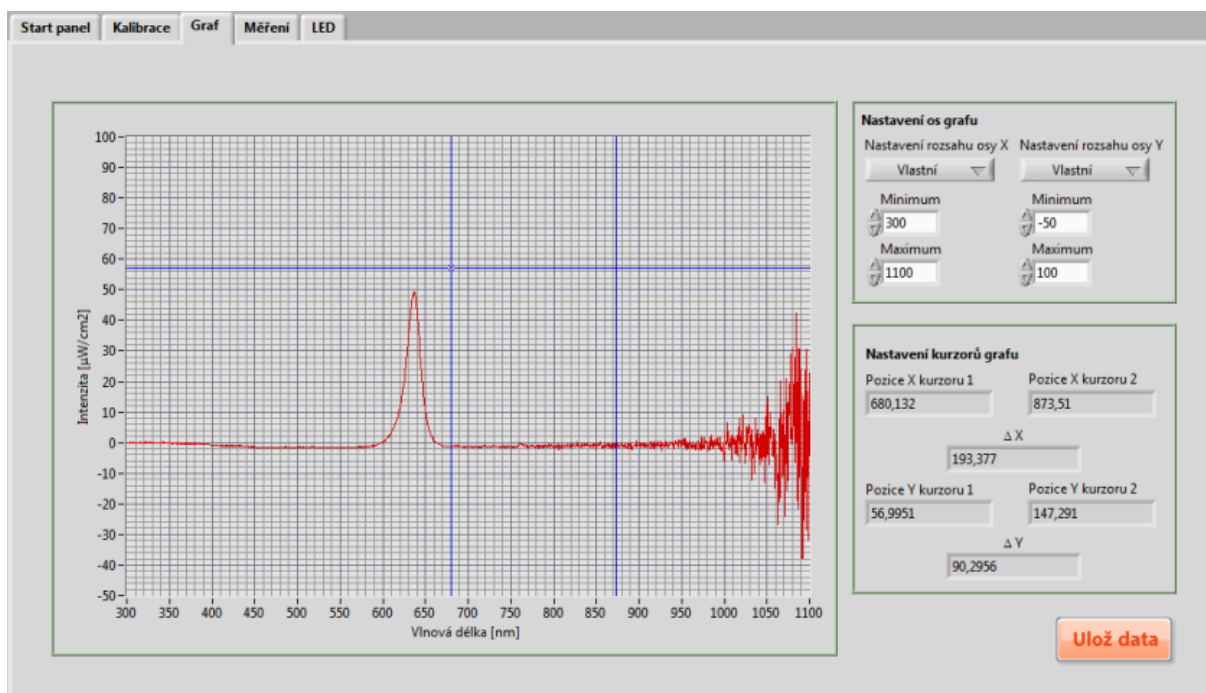
Světelný tok přijatý detektorem [Lumen]

Svitivost zdroje [Candela]

Měření peaku

	Intenzita [μW/cm ²]	Vlnová délka [nm]
Peak	46,91	636,7
Centrální vlnová délka	46,54	636,1
Centroid	46,44	637,1
FWHM [nm]	18,1	

Obrázek 43: Naměřená data pro červenou LED - sériově - paralelní kombinace 24 červených diod, napájecí proud $I_{LED} = 102$ mA

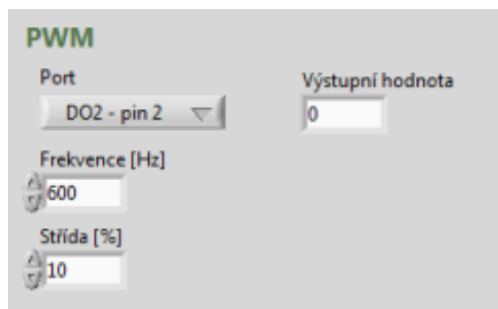


Obrázek 44: Spektrální charakteristika červené LED - sériově - paralelní kombinace 24 červených diod, napájecí proud $I_{LED} = 102$ mA

8.2 Testování ovládání PWM a analogových výstupů

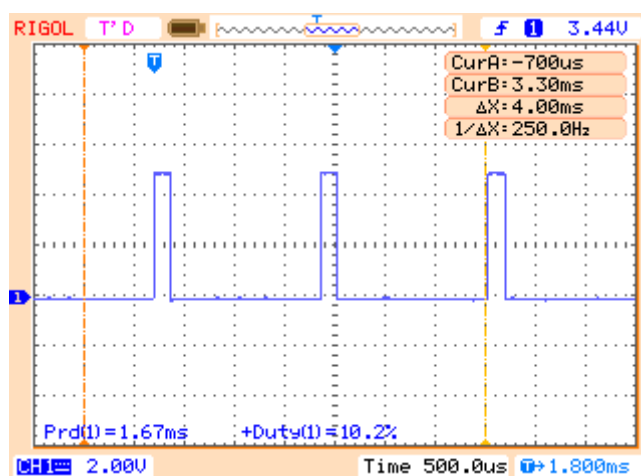
8.2.1 PWM

Měření bylo provedeno tím způsobem, že do 26pinového konektoru spektrofotometru byla zasunuta osciloskopická sonda. V LabVIEW pak byly nastavovány různé parametry pro PWM, a na osciloskopu byly sledovány změny v průběhu signálu.



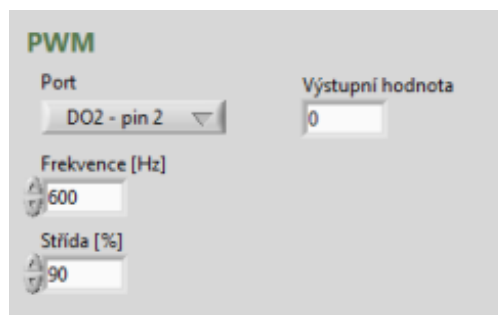
Obrázek 45: LabVIEW - Řízení PWM

Jako výstupní port byl zvolen pin 2, frekvence byla nastavena na 600 Hz a střída 10 %. Indikátor výstupu hlásí 0, což znamená, že nenastala žádná chyba.



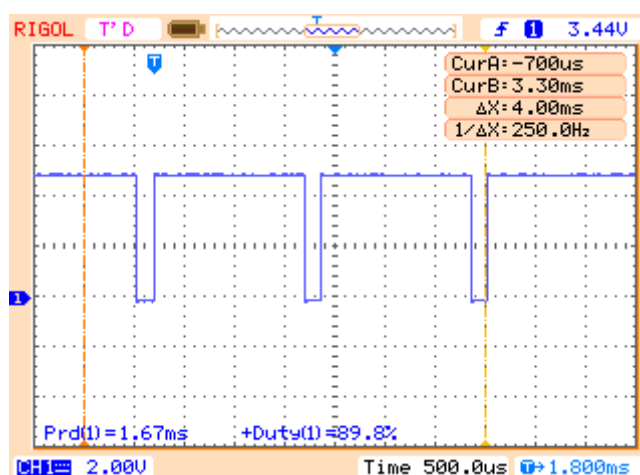
Obrázek 46: Záznam z osciloskopu

Podle přístroje se střída rovnala 10,2 % a perioda 1,67 ms (což odpovídá 598,8 Hz).



Obrázek 47: LabVIEW - Řízení PWM

Jako výstupní port byl opět zvolen pin 2, ani frekvence se nezměnila, pouze střída byla tentokrát nastavena na 90 %.

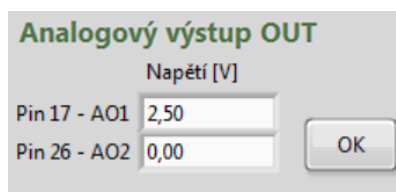


Obrázek 48: Záznam z osciloskopu

Podle přístroje se střída rovnala 89,8 % a perioda 1,67 ms (což odpovídá 598,8 Hz).

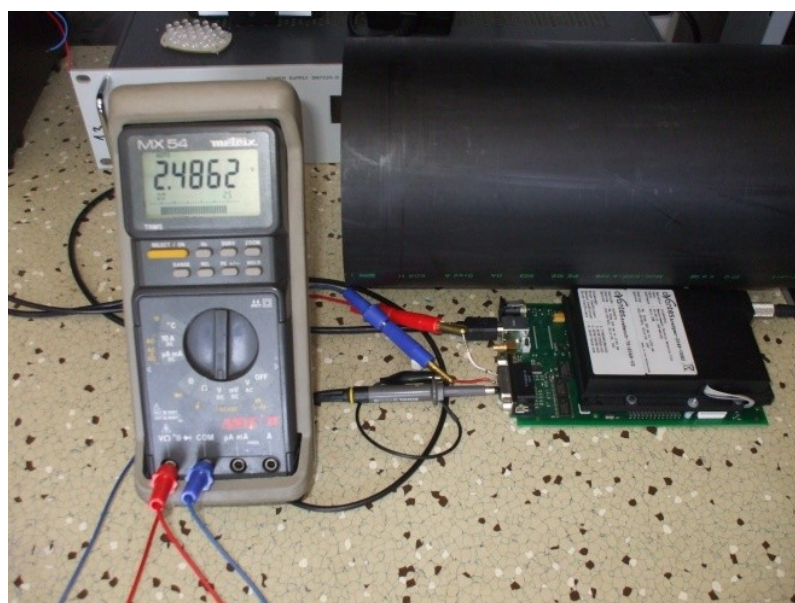
8.2.2 Analogové výstupy

Měření bylo prováděno obdobně, jako v případě PWM, ale výstupní napětí bylo sledováno na digitálním multimetru.



Obrázek 49: LabVIEW - Řízení analogového výstupu

Jako výstupní port byl zvolen pin 17, a napětí bylo nastaveno na 2,5 V.



Obrázek 50: Multimetr indikující výstupní napětí

Výstupní napětí se dle multimetru rovnalo 2,4862 V.

9 Zhodnocení výsledků

Na základě výsledků experimentálního měření bylo zjištěno, že měřicí sestava, a zároveň i software, pracují správně.

Výsledky spektrofotometrických měření byly porovnávány s hodnotami naměřenými originálním ovladačem (AvaSoft 7.7) a s katalogovými údaji firmy Avago (výrobce LED). Odchylky naměřených hodnot byly ve většině případů technicky zanedbatelné. Např. vlnová délka peaku modré LED má odpovídat 460 nm, a naměřeno bylo 463,4 nm. Příčinou vzniklé chyby mohlo být postupné zahřívání diod, případně nepřesné nastavení napájecího proudu.

Při testování ovládání PWM výstupů byla v prvním případě ve vytvořeném software v LabVIEW nastavena frekvence na 600 Hz se střídou 10 %. Digitální osciloskop indikoval střidu 10,2 % a periodu 1,67 ms (tedy frekvenci 598,8 Hz). Ve druhém případě byla v LabVIEW nastavena frekvence 600 Hz, střída 90 % a osciloskop indikoval střidu 89,8 % a periodu 1,67 ms (tzn. frekvenci 598,8 Hz). Nastavené a naměřené hodnoty tedy nejsou zcela identické, ale z technického hlediska akceptovatelné.

Zkoušení funkčnosti ovládání analogových výstupů probíhalo obdobně, jako u PWM, jen byl pro indikaci napětí použit digitální multimetr. Ve vytvořeném software v LabVIEW byla nastavena hodnota výstupního napětí na 2,5 V a multimetr naměřil napětí 2,4862 V. Ani v tomto případě se hodnoty zcela neshodovaly, ale odchylka činila pouze 0,552 %.

10 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést teoretickou analýzu fototerapie, navrhnout a sestavit experimentální měřicí pracoviště pro fototerapii, jehož hlavním komponentem bude spektrofotometr Avantes Avaspec - 2048, a naprogramovat nový ovládací software pro tento spektrofotometr ve vývojovém prostředí LabVIEW.

Fototerapie je léčebná metoda, využívající pozitivních účinků optického záření na lidský organismus. Úvodní dvě kapitoly teoretického rozboru jsem proto věnovala optickému záření a optice. Optické záření je elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami v rozmezí od 1 nm po 1 mm. Optika je pak naukou o tomto záření (především světle). Optické záření může být emitováno různými zdroji. Ty se dělí na přirozené (Slunce) a umělé. Ve fototerapii se nejvíce využívá zdrojů umělých.

Jak již bylo zmíněno, mým úkolem bylo navrhnout a zrealizovat měřicí pracoviště pro stanovování vlastností záření, jež je emitováno určitými zdroji. Hlavním komponentem sestavy je spektrofotometr, konkrétně typ Avantes Avaspec - 2048, schopný pracovat v rozsahu vlnových délek od 300 do 1100 nm. Ovládání je počítačové. Dále je součástí pracoviště měřicí tubus, jehož smyslem je vytvoření temného prostředí při měření.

Vzhledem k tomu, že použitý spektrofotometr Avantes je vybaven 26pinovým konektorem, který obsahuje, mimo jiné, dva analogové výstupy a šest výstupů pro PWM (pulsně šířkovou modulaci), může jím být řízen napájecí zdroj měřených LED. V rámci práce jsem zajistila softwarové ovládání náležících výstupů, ale samotné pracoviště bylo prozatím pouze navrženo. Obsahovalo by spektrofotometr, zdroj konstantního napětí a proudový zdroj, měřenou LED (případně celý řetězec diod) a rezistor - podrobnější náhled je pak na obrázku 12.

Hlavní problematikou, kterou jsem ovšem musela vyřešit, bylo vytvoření nového ovládacího software pro spektrofotometr Avantes. Tento program, vyvinutý v LabVIEW, nahradí stávající ovladač AvaSoft. Mezi nároky, které byly na software kladeny, patřila možnost provedení kalibrace, přepočet naměřených napěťových úrovní (A/D counts) na intenzitu, průběžné vyobrazování dat v grafu, určení peaku, vypočtení radiometrických, fotometrických a kolorimetrických veličin, uložení naměřených dat do souboru a řízení PWM a analogových výstupů. Všechny tyto požadavky byly splněny. Při programování jsem měla k dispozici knihovnu AS-5216-DLL a AVSIRRAD-DLL. Uživatelské rozhraní jsem vytvořila v záložkovém formátu s celkem pěti listy - *Start panel*, *Kalibrace*, *Graf*, *Měření* a *Řízení zdroje LED*.

Celá práce byla završena provedením experimentálního měření, kterým bylo otestováno zrealizované měřicí pracoviště a vytvořený program. Při testování byly naměřeny spektrální charakteristiky a určeny hodnoty radiometrických, fotometrických a kolorimetrických veličin tří druhů LED. Odchyly naměřených hodnot od předpokládaných byly ve většině případů technicky zanedbatelné. Rovněž byla odzkoušena funkčnost ovládání PWM a analogových výstupů. Nastavené a naměřené hodnoty nebyly zcela identické, ale z technického hlediska akceptovatelné.

Závěrem si troufám konstatovat, že všechny body zadání bakalářské práce byly úspěšně splněny. Vytvořené pracoviště i software mohou být použity v praxi, a lze je i nadále rozvíjet.

11 Literatura

- [1] ŠAJTER, V. *Elektroterapia a fototerapia*. Martin: Osveta, 2005. ISBN 80-8063-171-9.
- [2] HANUS, P.; HAVLÍK, I.; HUBÁČEK, J.; et al. *Moderní fototerapie a laseroterapie*. Praha: Manus, 2000. ISBN 80-902318-3-7.
- [3] LIEBERMAN, J. *Světlo: lék budoucnosti*. Praha: Blue step, 2006. 226 s. ISBN 80-239-6719-3.
- [4] JAVŮREK, J. *Fototerapie biolaserem: Léčebná metoda budoucnosti*. Praha: Grada Publishing, 1995. ISBN 80-7169-046-5.
- [5] TARÁBEK, P.; ČERVINKOVÁ, P; et.al. *Odmaturuj z fyziky*. 2. vyd. Brno: Didaktis, 2006. ISBN 80-7358-058-6.
- [6] VYSKOTOVÁ, J. *Přístrojová technika v rehabilitaci pro fyzioterapeuty*. 1. vyd. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, 2006. 127 s. ISBN 80-7368-196-X.
- [7] MAČÁK, J.; MAČÁKOVÁ, J. *Patologie*. Praha: Grada Publishing, 2004. ISBN 80-247-0785-3.
- [8] JIRÁSKOVÁ, M.; JIRÁSEK, L. *Záření a jeho působení na organismus* [online], 2002 [cit. 2012 - 09 - 04].
Dostupné z <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22941>
- [9] HRAZDIRA, I.; MORNSTEIN, V. *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. Brno: Neptun, 2004. ISBN 80-902896-1-4.
- [10] HRIVŇÁK, D. *Vlnění a optika*. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, 2004.
- [11] ČERNÁ, L. *Fotometrie, radiometrie a spektroskopie* [online], 2011 [cit. 2012 - 12 - 20].
Dostupné z <<http://pasan.feld.cvut.cz/dokumenty/fotometrie.pdf>>
- [12] NAVRÁTIL, L.; ROSINA, J. *Medicínská biofyzika*. Praha: Grada Publishing, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
- [13] *Polarizace světla* [online], 2011 [cit. 2013 - 01 - 07]. WikiSkripta.
Dostupné z <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Polarizace_sv%C4%9Btla>
- [14] *Polarizace světla* [online], 2007 [cit. 2013 - 01 - 07].
Dostupné z <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/462-polarizace-svetla>>
- [15] KUSALA, J. *Konstrukce laserů* [online], 2004 [cit. 2013 - 01 - 08].
Dostupné z <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/f4.htm>>
- [16] *Měření osvětlení* [online], 2011 [cit. 2012 - 12 - 21].
Dostupné z <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_lab_04.pdf>
- [17] *Ledové krystalky v polarizovaném světle* [online], 2010 [cit. 2013 - 01 - 07].
Dostupné z <<http://fyzmatik.pise.cz/16719-ledove-krystalky-v-polarizovanem-svetle.html>>

- [18] *Elektromagnetické spektrum* [online], 2012 [cit. 2013 - 01 - 07]. Wikipedia.
Dostupné z <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum>
- [19] *Umělé osvětlení a fotosyntéza* [online], [cit. 2013 - 01 - 07].
Dostupné z <<http://www.cidly.cz/cz-clanky-1.html>>
- [20] *Dispersion of White Light By a Glass Prism* [online], [cit. 2013 - 01 - 09].
Dostupné z <<http://www.tutorvista.com/content/physics/physics-ii/dispersion/glass-prism.php>>
- [21] PIHAN, R. *Polarizace* [online], 2011 [cit. 2013 - 01 - 07].
Dostupné z <http://www.fotoroman.cz/glossary2/2_polarizace.htm>
- [22] *Návod k použití - AVSIRRAD-DLL*. Nizozemsko: Avantes B.V., 2009.
- [23] *Katalog VII - Spectrometers Avantes*, 2012.
Dříve dostupné z <www.avantes.com>
- [24] *Monochromator* [online], [cit. 2013 - 03 - 20].
Dostupné z <<http://en.wikipedia.org/wiki/Monochromator>>
- [25] *Návod k použití - AVASPEC*. Nizozemsko: Avantes B.V., 2010.
- [26] VLACH, J.; HAVLÍČEK, J.; VLACH, M. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [27] HORŇÁK, P. *Svetelná technika*. Bratislava: ALFA, 1989. ISBN 80-05-00122-3.
- [28] *Fotometrie a kolorimetrie* [online], [cit. 2013 - 03 - 22].
Dostupné z <<http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FYSV/Fotometrie.pdf>>
- [29] SMEJKALOVÁ, H. *Způsoby hodnocení světlostálosti barevných fotografií*. Brno - Vysoké učení technické. Fakulta chemická. 2010. 42 s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Dzik, Ph.D.
Dostupné z <<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/1351/BP%20Smejkalov%C3%A1.pdf?sequence=1>>
- [30] KNÍŽEK, J. *Technická zařízení budov 40 - Umělé osvětlení* [online], 2004 [cit. 2013 - 03 - 23].
Dostupné z <http://www.tutorial.cz/_media/architektura/tzb/tzb40.doc>
- [31] *Co to je CRI?* [online], [cit. 2013 - 03 - 23].
Dostupné z <<http://www.cityled.cz/index.php/faq>>
- [32] *Dominant wavelength* [online], [cit. 2013 - 03 - 23].
Dostupné z <http://www.labcognition.com/onlinehelp/en/dominant_wavelength.htm>
- [33] *Complementary wavelength* [online], [cit. 2013 - 03 - 23].
Dostupné z <http://www.labcognition.com/onlinehelp/en/complementary_wavelength.htm>
- [34] *Barvy, barevné systémy* [online], [cit. 2013 - 03 - 23].
Dostupné z <<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/ZPG/00/6.pdf>>
- [35] FROHN, M.; OBERTHÜR, W. a kol. *Elektronika - Polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.

- [36] *LED* [online], [cit. 2013 - 03 - 26].
Dostupné z <http://cs.wikipedia.org/wiki/LED_dioda>
- [37] *Niels Ryberg Finsen* [online], [cit. 2013 - 04 - 07].
Dostupné z <http://cs.wikipedia.org/wiki/Niels_Ryberg_Finsen>
- [38] CELÝ, J. *Optická reflektivita křemíku* [online], [cit. 2013 - 04 - 10].
Dostupné z <<http://www.physics.muni.cz/~jancely/PPL/Navod.pdf>>
- [39] *Návod k použití - AS-5216-DLL*. Nizozemsko: Avantes B.V., 2011.
- [40] *What is the DLL?* [online], [cit. 2013 - 04 - 28].
Dostupné z <<http://support.microsoft.com/kb/815065/en-us>>

12 Seznam příloh

Příloha I - Charakteristiky a parametry LED použitých při experimentu

- Obrázek 1: Konstrukční parametry diod Avago
- Obrázek 2: Spektrální charakteristiky diod Avago (červená a modrá)
- Obrázek 3: Spektrální charakteristika bílé diody Avago
- Obrázek 4: Směrové charakteristiky diod Avago (červená a modrá)
- Obrázek 5: Směrová charakteristika bílé diody Avago
- Obrázek 6: Grafy závislosti světelného toku na proudu diodami Avago
- Obrázek 7: Voltampérové charakteristiky LED firmy Avago v propustném směru
- Tabulka 1: Parametry LED firmy Avago I
- Tabulka 2: Parametry LED firmy Avago II
- Tabulka 3: Parametry LED firmy Avago III

Příloha II - CD Bakalářská práce

- Elektronická verze bakalářské práce
- Ovládací software pro spektrofotometr Avantes